

**Univerzita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie**

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Geografie a kartografie



**KARTOGRAFICKÉ A GEOINFORMATICKÉ ZHODNOCENÍ  
SOUČASNÝCH BATYMETRICKÝCH MAP**

**CARTOGRAPHIC AND GEOINFORMATIC EVALUATION OF  
CURRENT BATHYMETRIC MAPS**

Bakalářská práce

Michal KUČERA

Praha 2014

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jakub JAROŠ

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Ve Studenci, 15. 8. 2014

.....

Michal Kučera

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé práce, Mgr. Jakubu Jarošovi, za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále RNDr. Tomáši Hrdinkovi, Ph.D. a RNDr. Miroslavu Šobrovi, Ph.D. za poskytnutá data a konzultace. Velké poděkování patří také mé rodině, která mne podporovala nejen během zpracování této práce, ale po celou dobu mého studia.

## **Kartografické a geoinformatické zhodnocení současných batymetrických map**

### *Abstrakt*

Práce se zabývá komplexním popisem postupů užívaných při tvorbě batymetrických map. V práci je prostor věnovaný různým metodám mapování břehové linie, dále jsou detailně popsány možnosti měření hloubek. V teoretické rovině je také prostor věnovaný popisu jednotlivých interpolačních metod, které lze aplikovat na naměřené bodové hodnoty hloubek. Následně je popsán princip fungování těchto metod v prostředí ArcGIS a je uvedena jejich použitelnost pro účely batymetrie. V další kapitole jsou popsány kartografické metody užívané v batymetrii a jsou navrženy a zhodnoceny možnosti, jak kombinací těchto metod docílit kvalitnějších kartografických výstupů. Mapy vytvořené těmito kombinacemi jsou součástí příloh.

Klíčová slova: batymetrie, mapa, gis, kartografie, interpolace

## **Cartographic and geoinformatic evaluation of current bathymetric maps**

### *Abstract*

This thesis is focusing on methods used in the process of creating bathymetric maps of lakes. In the first part of the thesis are described methods used for shoreline mapping and possibilities of depth measurements. In the theoretical part are also described interpolation methods which could be applied on point datasets. At first is given general description of these methods and after that follows also the detailed description of these methods in ArcGIS. Next part of the thesis describes cartographic methods used in bathymetry and in this part are also evaluated current bathymetric maps. The main discussion in this part is regarding cartographic and geoinformatic methods used in the process of creation these maps. In the last part is suggested a new attitude in this process and there are also created bathymetric maps using new combination of cartographic methods. These maps are enclosed at the end of the thesis.

Key words: bathymetry, map, gis, cartography, interpolation

# OBSAH

1	Úvod.....	8
2	Uvedení do problematiky .....	9
2.1	Vymezení pojmu batymetrie.....	9
3	Sběr batymetrických dat.....	10
3.1	Mapování břehové linie .....	10
3.1.1	Polární metoda.....	10
3.1.2	Ortogonální metoda .....	11
3.1.3	Metoda trigonometrie .....	12
3.1.4	GNSS – Global Navigation Satellite System.....	13
3.1.5	Letecká fotogrammetrie.....	13
3.1.6	Letecké laserové skenování .....	14
3.2	Metody měření hloubek .....	14
3.2.1	Moderní přístroje .....	14
3.2.1.1	Jednopaprscitý sonar (Single beam echo sounder) .....	15
3.2.1.2	Mnohapaprscitý sonar (Multibeam echo sounder).....	15
3.2.1.3	Lidar .....	16
4	Zpracování dat.....	18
4.1	Batymetrie v GIS .....	18
4.2	Prostorová interpolace bodových dat.....	18
4.2.1	Interpolační metody .....	19
4.2.1.1	Thiessenovy polygony .....	19
4.2.1.2	Nearest Neighbor – metoda nejbližšího souseda .....	21
4.2.1.3	Natural Neighbor – metoda přirozeného souseda .....	21
4.2.1.4	Inverse Distance Weighting (IDW) .....	23
4.2.1.5	Spline .....	25
4.2.1.6	Kriging.....	27
4.2.2	TIN – Triangulated Irregular Network .....	30
4.2.3	Hodnocení kvality interpolace .....	31
4.2.3.1	Cross-Validation .....	32
4.3	Geoinformatické zpracování v softwaru ArcGIS.....	32
4.3.1	Metoda nejbližšího souseda.....	33
4.3.2	Metoda přirozeného souseda .....	34
4.3.3	IDW .....	35
4.3.4	Spline .....	36
4.3.5	Kriging.....	37
4.3.6	TIN .....	38
4.3.7	Topo to Raster .....	38
5	Kartografické metody užívané v batymetrii .....	40
5.1	Izolinie .....	40
5.2	Metoda izoplet .....	43

5.3	Kótované body .....	46
5.4	Stínování .....	47
5.5	Šrafy .....	48
5.6	Kopečková metoda .....	49
5.7	Mapě příbuzná zobrazení .....	49
5.7.1	Blokdiagram .....	49
5.7.2	Pohledová mapa .....	50
5.7.3	Metoda příčných profilů .....	50
6	Diskuze s literaturou .....	52
6.1	Mapování břehové linie .....	52
6.2	Měření hloubek .....	52
6.3	Interpolace .....	54
6.4	Kombinace metod znázorňování hloubek .....	56
7	Závěr .....	59
	Seznam zdrojů informací .....	61
	Seznam příloh .....	68

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Pevné stanoviško .....	10
Obr. 2 Staničení a kolmice .....	11
Obr. 3 Polygonový pořad při mapování břehové linie .....	12
Obr. 4 Jednopaprscitý vs. mnohapaprscitý sonar (single beam vs. multibeam) .....	16
Obr. 5 Systém DIAL .....	17
Obr. 6 Princip Thiessenových polygonů .....	20
Obr. 7 Thiessenovy polygony .....	20
Obr. 8 Metoda nejbližšího souseda .....	21
Obr. 9 Metoda přirozeného souseda .....	22
Obr. 10 Inverse Distance Weighting .....	23
Obr. 11 Charakter IDW pro $\alpha = 1, 2$ a 10 (červená, modrá, fialová křivka) .....	24
Obr. 12 Bull eyes .....	24
Obr. 13 Spline .....	25
Obr. 14 Regularized Spline vs. Tension Spline .....	26
Obr. 15 Variogram mrak, empirický variogram .....	28
Obr. 16 Nugget, Range, Sill .....	29
Obr. 17 Modely variogramů .....	29
Obr. 18 Povrch vytvořený metodou Kriging .....	30
Obr. 19 Delaunay triangulace .....	31
Obr. 20 Extract by Mask .....	33
Obr. 21 Metoda nejbližšího souseda .....	34
Obr. 22 Metoda přirozeného souseda .....	34
Obr. 23 Metoda IDW .....	35
Obr. 24 Tension Spline vs. Regularized Spline .....	37
Obr. 25 Ordinary Kriging .....	37
Obr. 26 TIN .....	38
Obr. 27 Rasterizace .....	39
Obr. 28 Topo to Raster .....	39
Obr. 29 Batymetrická mapa vytvořená hloubnicemi .....	42
Obr. 30 Batymetrická stupnice - jezero Čimice .....	44
Obr. 31 Batymetrická stupnice - jezero Huron .....	45
Obr. 32 Jiná batymetrická stupnice - jezero Huron .....	45
Obr. 33 Kombinace hloubnic, barevné batymetrie a výškových kót .....	46
Obr. 34 Kráterové jezero (Oregon, USA) - stínování .....	47
Obr. 35 Atlantský oceán - kopečková metoda .....	49
Obr. 36 Blokdiagram .....	50
Obr. 37 Příčný profil .....	51
Obr. 38 Profily .....	53
Obr. 39 Mapování pomocí GPS .....	54
Obr. 40 Hloubnice, stínování, barevná batymetrie .....	56
Obr. 41 Hloubnice, barevná batymetrie, kótované body .....	57
Obr. 42 Izolinie oddělující pouze izoplety .....	57
Obr. 43 Hloubnice, stínování, kótované body .....	58
Obr. 44 Hloubnice, gradient, kótované body .....	58

# 1 ÚVOD

Podnětem pro vznik této bakalářské práce bylo zjištění, že přestože se můžeme v dnešní době setkat s velkým množstvím batymetrických map jezer, v literatuře není problematice tvorby těchto map věnován skoro žádný prostor. Neexistuje literatura, která by komplexně pokrývala tuto problematiku. Dalším důvodem bylo také to, že na rozdíl od zpracování teorie výškopisu se teorií batymetrie zabývá málo literatury. Z těchto důvodů jsem se rozhodl zaměřit se na toto téma a napsat na to svou bakalářskou práci. Jelikož se batymetrie zabývá měřením hloubek vodních ploch různých velikostí od tůní, přes jezera až po moře a oceány a nebylo by možné v rámci jedné práce pokrýt celou tuto problematiku, rozhodl jsem se zaměřit pouze na témata týkající se batymetrie jezer.

Hlavním cílem této práce je popsat a zhodnotit postupy, které je možné v současné době uplatnit při tvorbě batymetrických map jezer. Práce je strukturovaná stejně tak, jako probíhá samotný postup při tvorbě batymetrické mapy. Nejprve jsou v práci uvedeny a zhodnoceny možnosti mapování břehové linie, následně je zde prostor věnovaný různým metodám měření hloubek. Na to navazuje obecný popis interpolačních metod, které je možné aplikovat na naměřené bodové hodnoty hloubek. Další kapitola je věnovaná popisu fungování těchto metod v prostředí ArcGIS. Společně s jejich popisem je vždy také uvedena a zdůvodněna jejich použitelnost pro účely batymetrie. V další části jsou pak popsány kartografické metody užívané v batymetrii. V závěrečné části této bakalářské práce jsou diskutovány možnosti vhodné kombinace těchto metod a mapy vytvořené těmito kombinacemi jsou součástí příloh.



## 2 UVEDENÍ DO PROBLEMATIKY

### 2.1 Vymezení pojmu batymetrie

Termín batymetrie vychází z řeckého *bathos* (hloubka) a je definován jako „měření hloubek oceánů“ (Gwinn et. al., 1987 in Pokorná, 2004) a dalších vodních ploch a také jako informace odvozená z těchto měření (Merriam-Webster Online Dictionary, 2014).

Jak píše Huggett (2008) – historicky se termín batymetrie používal pro měření na mořích a oceánech, avšak za posledních 100 let se tento pojem začal používat také pro měření a mapování sladkovodních děl. Pokorná (2006) udává, že batymetrie se používá při tvorbě přesných map pro námořní lodě a jejich plavbu. Dále nachází uplatnění v průmyslových odvětvích, například při hledání ropných polí nebo pokládání podmořských kabelů, případně lze batymetrii uplatnit při hledání vraků lodí či vyhledávání min. Batymetrie je důležitá pro vytváření přesných map rozložení hloubek vodních ploch pro následné další využití v jiných vědních oborech. Nejčastěji se batymetrie využívá pro vytváření map jezer a právě to je hlavním tématem této bakalářské práce.

Pokud shrneme výše uvedené informace, cílem batymetrie je stanovit a následně kartograficky zaznamenat výškový rozdíl mezi hladinou a dnem vodní plochy. V tomto směru je batymetrie velmi blízká zpracování výškopisu, při kterém se měří a zaznamenávají rozdíly výšek mezi terénem a referenčním nulovým bodem. V kapitolách zabývajících se způsoby měření batymetrických dat a jejich následným kartografickým zpracováním, proto bude věnován prostor i rešerši postupů a metod využívaných při zpracování výškopisu. Důraz bude kladen na zvážení jejich použitelnosti v batymetrii.

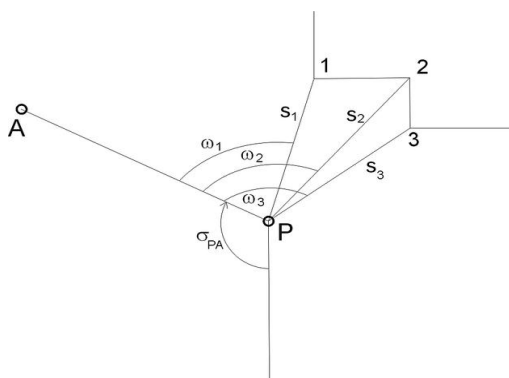
## 3 SBĚR BATYMETRICKÝCH DAT

### 3.1 Mapování břehové linie

Ještě před samotným měřením hloubek dané vodní plochy je nutné mít zmapovanou břehovou linii, což lze provádět několika způsoby. V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé metody, které je možné pro toto mapování použít.

#### 3.1.1 Polární metoda

Polární metoda je jedna ze základních metod měření polohopisu užívaných v geodézii, při které se podrobné body zaměřují polárními souřadnicemi – vodorovným úhlem a délkou. Vodorovný úhel je rozdíl směrů měřených na určovaný bod a orientační bod, kde orientační bod je bod o známých souřadnicích. Délka je vodorovná vzdálenost od stanoviště k určovanému bodu. K zaměření se může použít pevné či volné stanoviště. Pevné stanoviště je zřízeno na bodě o známých souřadnicích, počet orientačních bodů je 1-9. Princip měření pomocí pevného stanoviště je patrný z obrázku 1, kde P je pevné stanoviště, A je orientační bod, podrobné body jsou označeny 1, 2, 3. Na obrázku jsou dále označeny vodorovné úhly  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  a  $S_1, S_2$  a  $S_3$  jsou délky od stanoviště k podrobným bodům. Dále  $\sigma_{PA}$  značí orientovaný úhel od kladného ramene osy x k přímce PA (Vichrová, 2011).



**Obr. 1 Pevné stanoviště**

(zdroj: <http://gis.zcu.cz/studium/gen1/html/Obrázky/Kapitola08/8x11-Polar.met-pevn.st.vypocet.jpg>)

Volné stanoviště je zřízeno na místě o neznámých souřadnicích. Přičemž souřadnice volného stanoviště se určí až po měření na orientační body, a proto se číslo

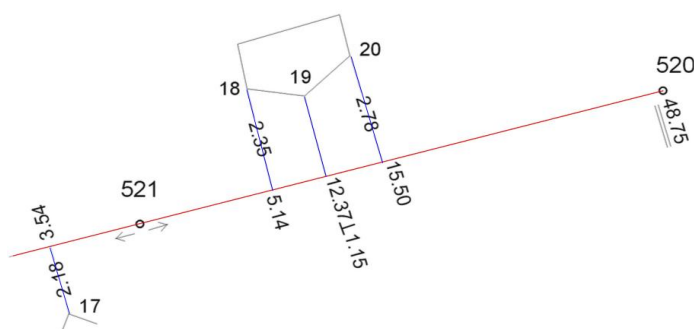
volného stanoviska zapisuje do měřického zápisníku jako první určovaný bod. Počet orientačních bodů je 2-9.

U polární metody se také používá polární doměrek a polární kolmice. Polární doměrek je délka od místa, kam jsme cílili k místu, kam jsme chtěli cílit. Měří se například v případě, kdy je vnitřní roh budovy nepřístupný. Polární kolmice je kolmice k měřické přímce a staničení. Kolmice a staničení jsou popsány v kapitole 3.1.2 o ortogonální metodě. Kolmice a staničení se používají, pokud není vidět ze stanoviska na určovaný bod (VUGTK, 2014).

Pro mapování břehové linie je polární metoda vhodná, pokud chceme měřit velké množství bodů na břehové linii a vidíme na mnoho z nich teodolitem či totální stanicí. Také je rychlejší, jednodušší na realizaci a přesnější i ve složitém terénu, než ortogonální metoda. Bližšímu popisu této metody se věnuje geodetická literatura, například Hauf (1982), případně Pokora (1985).

### 3.1.2 Ortogonální metoda

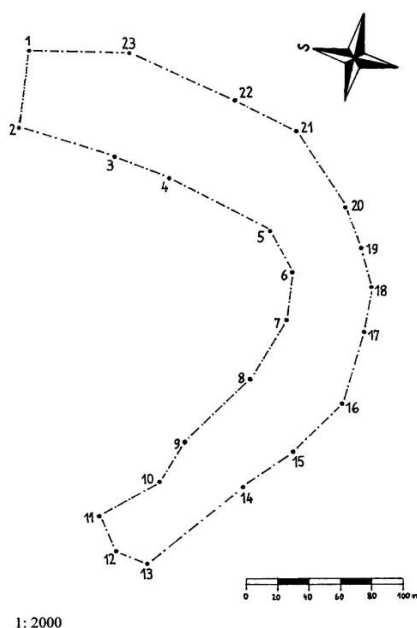
Ortogonální metoda je metoda měření polohopisu, při které se využívá uzavřený polygonový pořad a podrobné body se zaměřují pravoúhlými souřadnicemi – kolmicí k měřické přímce a staničením. Obojí je patrné z obrázku 2. Staničení je délka měřená od počátku po měřické přímce, v našem případě je staničení označeno červenou barvou. Kolmice je vzdálenost kolmá k měřické přímce měřená mezi určovaným bodem a měřickou přímkou, na obrázku 2 je zobrazena modrou barvou. K zaměření se může použít pevná či volná měřická přímka. Pevná je připojena na body ležící na této přímce, kdežto volná je připojena na body ležící mimo tuto přímku (Vichrová, 2011).



**Obr. 2 Staničení a kolmice**

(zdroj: <http://gis.zcu.cz/studium/gen1/html/Obrázky/Kapitola08/8x06-Ortog.metoda-pevna.meric.pr.jpg>  
vlastní úprava)

Polygonový pořad je zobrazen na obrázku 3. Je to prostorová lomená čára, určená pomocí vodorovně měřených délek stran a vodorovnými úhly, které spolu strany svírají. Alespoň jednu stranu polygonového pořadu je nutné zorientovat (Čapek, 1992). Polygonové strany mají funkce základů, vůči nimž se určuje poloha podrobných bodů na břehové linii pomocí pravoúhlých souřadnic – kolmicemi a staničením. Kvůli přesnosti je potřebné vést polygonové strany co nejbližší k břehové linii dané vodní plochy (Čapek, 1992 in Česák, Šobr, 2005).



**Obr. 3 Polygonový pořad při mapování břehové linie**  
(zdroj: Šobr, 2007)

### 3.1.3 Metoda trigonometrie

Metoda trigonometrie by se také dala využít k měření bodů na břehové linii. Tato metoda je založena na protínání vpřed, které můžeme dále dělit na protínání z úhlů, protínání z délek a protínání z orientovaných směrů.

Metoda trigonometrie je složitější na realizaci a velice časově náročná. Z těchto důvodů ji pro mapování břehové linie nelze doporučit. Principem této metody se dopodrobna zabývá geodetická literatura. Podobně jako u polární metody v kapitole 3.1.1 lze doporučit například Haufa (1982), Pokoru (1985), případně Ratiborského (1995).

### **3.1.4 GNSS – Global Navigation Satellite System**

Metoda GNSS využívá princip výpočtu polohy v terénu na základě určení vzdálenosti mezi družicí a GPS (Global Positioning System). Pro modelování terénu se používají metody diferenciální GPS (DGPS), které fungují na principu oprav GPS měření v terénu. Východiskem pro tuto metodu je to, že vliv atmosféry a dalších chybových faktorů je v oblasti o poloměru zhruba 50 km stejný. DGPS se skládá ze sítě stanic, které provádějí měření 24 hodin denně a jsou pravidelně rozmístěny. Každá GPS stanice je umístěna na bodě o známých souřadnicích, jež byly určeny například geodeticky. Referenční stanice z rozdílu známé a změřené polohy vypočítá korekce, které jsou následně rozeslány ve formě navigační zprávy do GPS přijímačů pracujících v terénu, případně je možné data z referenční stanice stáhnout po měření v terénu a data následně opravit. Při tomto zpracování naměřených hodnot můžeme docílit polohové chyby v řádech milimetrů (Oršulák, Pacina, 2010).

Vzhledem k přesnosti měření po opravě naměřených dat o údaje z referenční stanice lze použití GPS přístrojů k měření břehové linie rozhodně doporučit.

### **3.1.5 Letecká fotogrammetrie**

Další možností mapování břehové linie je využití letecké fotogrammetrie. V porovnání s leteckým laserovým skenováním, jež je detailněji popsáno v kapitole 3.2.1.3, používá letecká fotogrammetrie pasivní senzor, což znamená, že je závislá na vnějším zdroji záření. Tím je nejčastěji slunce a sběr dat je tedy omezen pouze na světlou část dne. Dále musí panovat příznivé atmosférické podmínky – oblačnost výrazným způsobem ovlivňuje využitelnost této metody. Dalším negativem letecké fotogrammetrie je, že v oblastech s hustou vegetací je získávání dat velmi náročné, někdy i nemožné. Je to z toho důvodu, že souřadnice bodů při letecké fotogrammetrii jsou určovány dodatečně v rámci vyhodnocování stereoskopické dvojice snímků (Baltsavias, 1999a). Kromě stereoskopické dvojice snímků mohou být hlavním výstupem letecké fotogrammetrie letecké snímky – ortofota. Jejich vektorizace může také sloužit jako zdroj dat použitý při mapování břehové linie.

Z výše popsaných důvodů je zřejmé, že letecká fotogrammetrie pro k mapování břehové linie je využitelná pouze v oblastech bez husté vegetace v blízkosti mapovaných vodních ploch. Vegetace totiž jinak brání určení přesných souřadnic bodů

na břehové linii a pro mapování v těchto místech lze tudíž více doporučit některou z dalších metod.

### **3.1.6 Letecké laserové skenování**

Leteckým laserovým skenováním se podrobně zabývá kapitola 3.2.1.3, kde je popsána vhodnost této technologie jak pro mapování břehové linie, tak pro měření hloubek.

## **3.2 Metody měření hloubek**

Po vyměření půdorysu daného vodního díla následuje měření hloubek. Dříve se hloubky měřily pomocí olovnice nebo závaží spuštěného na dno vodní plochy a odečtením dané hloubky. Na našem území tuto metodu poprvé použil pro systematická měření hloubek prof. Václav Švambers, který v roce 1903 započal měření šumavských jezer. Pro půdorysná měření používal Švambers teodolit nebo speciální úhloměr. Při měření hloubek napnul přes jezero označený ocelový drát se značkami po 10 metrech a postupně na těchto značkách spouštěl na ocelových lankách závaží ze sondovacího zařízení (Šobr, 2003). Po dlouhá desetiletí se tedy výzkumníci neobešli bez teodolitu pro úhlová měření, pásem pro délková měření a olovnice pro hloubková měření (Švambers 1912, Kuchař 1947 in Česák, Šobr 2005). Naměřené hodnoty délek, úhlů a hloubek byly zpracovávány ručně. Byla prováděna ruční interpolace a ručně tak vznikala celá mapa. Tento způsob byl však velice časově náročný a v dnešní době jsou již k dispozici moderní přístroje, které tuto zdlouhavou práci urychlují.

### **3.2.1 Moderní přístroje**

Mezi takovéto přístroje se řadí echolot, čili sonar. Princip echolotu byl vynalezen německým fyzikem Alexanderem Behmem, který se po katastrofě Titanicu 15. dubna 1912 snažil přijít na způsob, jak detekovat kusy ledovce použitím odražených zvukových vln. Ukázalo se, že zvukové vlny nejsou vhodné pro detekování ledovců, ale pro měření hloubky moře ano, protože mořské dno tyto vlny odráží velmi dobře (Salous, 2013).

Princip měření echolotu a jeho reálné použití je patrné z popisu měření hloubek jezera Fletcher v Yosemitešském národním parku v USA, které provedl Brian Huggett

v červenci roku 2008. Při výzkumu byl využit echolot Vexilar LPS 1, který zaznamenával informace o hloubkách každých 15 vteřin. Hloubka v daném místě byla vypočítána na základě zvukového impulsu, který byl z lodě vyslán ke dnu dané vodní plochy a měřil se čas, za který se signál odrazí zpět k sondě. Informace o poloze byly doplněny díky GPS, která zaznamenávala informace každých 15 vteřin. Tyto dva zdroje informací měly společnou proměnnou – čas, kdy byly obě hodnoty naměřeny. Tato měření se na jezeře opakovala třikrát, přičemž bylo na ploše jezera 3,5 ha nasbíráno za krátký čas více než 280 bodů, na jejichž základě byla poté zpracována batymetrická mapa jezera (Huggett, 2008).

V dnešní době existuje mnoho přístrojů, pomocí kterých můžeme měřit vzdálenosti v kapalném prostředí. V následujících podkapitolách bude nastíněno a popsáno jejich základní rozdělení. Vlastnosti jednotlivých typů sonarů se samozřejmě liší přístroj od přístroje a to se také promítá na jejich pořizovací ceně. Proto bude u jednopaprscitého a mnohapaprscitého sonaru také uveden konkrétní model sonaru a k němu jeho podrobnější specifikace s ohledem na batymetrická měření.

#### **3.2.1.1 Jednopaprscitý sonar (*Single beam echo sounder*)**

Jednopaprscitý sonar je charakteristický tím, že vysílá ke dnu pouze 1 paprsek. Jak je patrné z obrázku 4, tak nedokáže pokrýt příliš velkou oblast najednou a tudíž je pro měření hloubek méně vhodný než mnohapaprscitý sonar (viz. kapitola 3.2.1.2). Naměřené hodnoty z jednopaprscitého sonaru mohou být zaznamenávány profilově s časovým určením nebo pomocí souřadnic x, y, z.

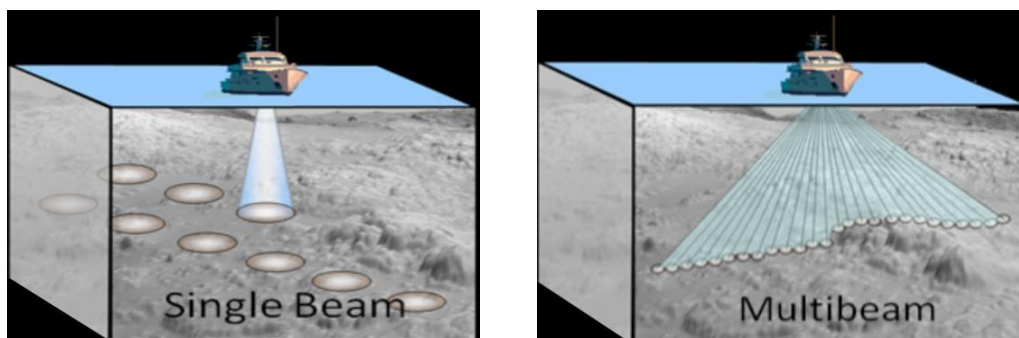
Stěžejním parametrem pro batymetrická měření je hloubka, jakou je schopen sonar měřit a také přesnost, s jakou měří. Tyto údaje jsou u každého přístroje specifické a také závisí na pořizovací ceně přístroje. Například sonar MS 1000ES je schopen měřit na různých frekvencích od hloubky 0,5 m až do hloubky 400 m. Úhlové rozpětí vyslaného paprsku je od 2,5° do 10° (Kongsberg Maritime, 2014).

#### **3.2.1.2 Mnohapaprscitý sonar (*Multibeam echo sounder*)**

Mnohapaprscité sonary se vyznačují tím, že na rozdíl od jednopaprscitých nevysílají pouze jeden paprsek, ale více najednou, tudíž jsou schopny zmapovat dno vodní plochy mnohem rychleji a efektivněji, jak naznačuje obrázek 4. Podobně jako u

jednopaprscitých sonarů i u mnohapaprscitých je možné získat naměřená data ve formě souřadnic x, y, z, případně profilově.

Vlastnosti jednotlivých sonarů jsou stejně jako u jednopaprscitých sonarů specifické a závisí na pořizovací ceně. Například model EM 710 dokáže najednou zmapovat oblast o šířce 140° a je schopný měřit hloubky od 3 do 2 000 metrů s odchylkou 0,1 – 0,16 % (Kongsberg Maritime, 2014).



**Obr. 4 Jednopaprscitý vs. mnohapaprscitý sonar (single beam vs. multibeam)**

(zdroj: [http://oceanexplorer.noaa.gov/oceanos/explorations/ex1105/media/ex1105\\_4.html](http://oceanexplorer.noaa.gov/oceanos/explorations/ex1105/media/ex1105_4.html) vlastní úprava)

### **3.2.1.3 Lidar**

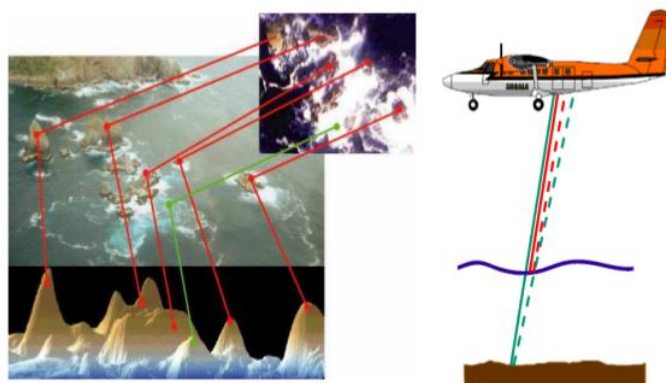
Systém Lidar (LIght Detection And Ranging) je jedním z nejefektivnějších prostředků, jak měřit hloubky vod do 50 metrů. Jeho hlavní předností je přesnost, rychlost mapování a plošné pokrytí v závislosti na typu skeneru.

Vlastní princip lidarů lze považovat za velmi jednoduchý, jelikož se celý přístroj skládá pouze z pěti základních prvků. Zdroje laserového záření, optické soustavy, mechanického prvku, detektoru elektromagnetického záření a velmi přesných hodin. Zdroj laserového záření vysílá záření směrem k objektu, kde se paprsky odrazí a vrací se zpět k detektoru. Koncentrace paprsků do velmi úzkého svazku je zajištěna pomocí optické soustavy společně s souosostí detektoru a emitru. Souosost je většinou zajišťována polopropustným hranolem. Poslední optický člen soustavy, jímž je zpravidla hranol nebo zrcadlo je umístěn na mechanickém prvku, jenž zajišťuje směrování paprsku vždy pod jiným úhlem. Důležitou součástí lidarů jsou také velmi přesné hodiny, které měří čas od vyslání svazku paprsků až po jejich zpětné zaznamenání na detektoru. Díky znalosti rychlosti šíření světla tak lze snadno určit vzdálenost objektu od lidarů. Vzhledem ke znalosti směru vyslaného svazku paprsků a odvozené vzdálenosti je poté určena poloha každého měřeného bodu.



Nevýhodou technologie lidarů pro účely batymetrie je, že nejčastěji využívá infračervené záření a ze spektrální charakteristiky vody je známo, že voda infračervené záření téměř zcela pohlcuje. Musí být tedy rozlišeno, zda je mapována břehová linie, nebo naopak dno pod vodní hladinou. Pro mapování břehové linie je vhodné infračervené záření, ale pro mapování pod vodní hladinou je nutné použít zelenou, případně modrozelenou část spektra. Je to z toho důvodu, že paprsky v tomto světelném spektru nejsou vodou pohlcovány a odrazí se tedy od dna vodní plochy.

Jak je patrné z obrázku 5, je v dnešní době možné využít systému DIAL (Differential Absorption Lidar), který používá jak infračervené záření, tak současně i záření zelenomodré, tudíž je najednou mapováno jak dno vodní plochy, tak břehová linie (Dolanský, 2004). Jak uvádí Jaroš (2011), přesnost leteckého laserového skenování se pohybuje v horizontálním směru řádově v centimetrech až decimetrech (Badea; Jacobsen, 2008 in Jaroš, 2011) a ve vertikálním směru dosáhli např. (Pfeifer; Kraus, 1998 in Jaroš, 2011) přesnosti 10 cm. Kvalita měřících přístrojů a s tím i jejich přesnost se neustále zvyšuje. Aby bylo měření hloubek co nejpresnější, je nutné ho provádět za co nejvýhodnějších podmínek. To znamená – jasné počasí a co nejprůzračnější voda. Prostupnost vodou může ovlivnit i kalnost či vodní řasy (Pokorná, 2006).



**Obr. 5 Systém DIAL**

(zdroj: Optech 2004, in Dolanský, 2004)

## 4 ZPRACOVÁNÍ DAT

### 4.1 Batymetrie v GIS

Tématem vytváření batymetrických map v prostředí GIS se v Česku nejvíce zabývala Jana Kuchařová (2009) v bakalářské práci Možnosti interpolace jezerních pánví různých genetických typů, kde byl však prostor věnovaný spíše popisu jednotlivých genetických typů jezer a následnému porovnání výsledků různých interpolačních metod. Popisy jednotlivých interpolačních metod jsou zde však shrnuty pouze velice stručně.

Ve světě se batymetrií v GIS zabýval Brian Huggett z kalifornské Humboldt State University, který ve své práci Fletcher Lake Bathymetry (2008) popisuje práci při vzniku batymetrické mapy. Jak Huggett (2008) sám píše, „práce je určena pro osoby s velice malými až nulovými zkušenostmi v prostředí ArcGIS, kde je popsáno skoro každé kliknutí myši“. V práci je poměrně detailně popsán postup implikace naměřených dat do prostředí ArcGIS, ale není zde věnovaný žádný prostor výběru vhodné interpolační metody (byla zvolena metoda spline, protože výsledek je hladce vypadající). V práci dále nejsou popsány ani možnosti vizualizace naměřených dat.

V neposlední řadě je zde nutné zmínit bakalářskou práci Lindy Křikavové (2009) Interpolace bodových dat v GIS. Tato práce popisuje interpolační metody jak z hlediska obecného, tak jejich podstatu a nastavení v prostředí ArcGIS a sloužila jako cenný zdroj informací pro napsání následujících kapitol.

### 4.2 Prostorová interpolace bodových dat

„Metody prostorové interpolace slouží k odhadu hodnot určitého jevu či jeho intenzity v libovolném místě studované plochy, pro niž existují známé hodnoty tohoto jevu pouze v určitých lokalitách“ (Hellebrand, 2011). V prostorové interpolaci je tedy hodnota jevu odvozována ve všech místech plochy z hodnot měření ve vybraných místech. Každé místo má posléze hodnotu danou buďto měřením, nebo odhadem (Kraus, 2007).

Prostorovou interpolaci můžeme použít k vytvoření spojitého povrchu na základě pouze malého množství bodů, avšak čím více naměřených bodů máme, tím detailnější povrch můžeme získat. Podstatou interpolace je vlastně první pravidlo geografie formulované Waldo Toblerem, které říká, že všechno souvisí se vším, ale

blízké věci spolu souvisí více, než věci vzdálené (Tobler, 1970 in Miller, 2004). V praxi si to můžeme představit tak, že pokud prší na jedné straně ulice, pak bude pravděpodobně pršet i na druhé straně ulice. Pořád je možné, že bude pršet na druhém konci města, i když je to méně pravděpodobné. Ale už jen málo pravděpodobné je, že prší o 30 kilometrů dál.

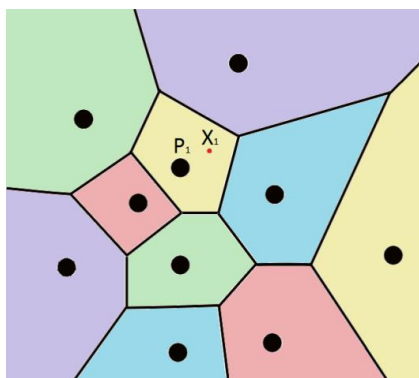
### 4.2.1 Interpolační metody

Interpolační metody můžeme rozdělit podle různých kritérií na více druhů: Metody statistické se opírají o prvek náhodné veličiny. Metody deterministické nepoužívají statistické předpoklady, ale jsou založeny na racionálním úsudku, případně na formálních požadavcích na interpolační funkci (Ježek, 2008). Globální metody do výpočtu zahrnují všechny měřené body, čímž způsobí, že změna jednoho vstupního bodu ovlivní výsledek v celé lokalitě. Na druhé straně metody lokální aplikují výpočet na menší část z celkového množství bodů a změna vstupní hodnoty tedy ovlivní jen výsledek v této menší oblasti (Křikavová, 2009).

V následující kapitole jsou nejprve popsány Thiessenovy polygony. Je to z toho důvodu, že jsou úzce spjaty s interpolačními metodami nejbližšího souseda a přirozeného souseda. Podrobnější popis těchto interpolačních metod je pak uveden v kapitolách 4.2.1.2 a 4.2.1.3.

#### 4.2.1.1 Thiessenovy polygony

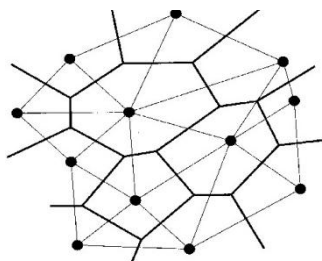
Neboli Voronoiovy diagramy mají za cíl vytvořit teselaci – rozdělit plochu do polygonů. Jsou základem některých interpolačních metod jako metody nejbližšího souseda, přirozeného souseda a dále souvisí s TIN (Triangulated Irregular Network). Thiessenovy polygony byly v praxi poprvé použity americkým meteorologem Alfredem H. Thiessenem k určení srážkových průměrů na území povodí v roce 1911 a byly po něm také později pojmenovány (Kolář, 2003). Jsou definovány pomocí jednoduchého geometrického pravidla – každý polygon obsahuje právě jeden bod. Všechny body uvnitř tohoto polygonu jsou blíže tomuto naměřenému bodu, nejsou blíže jiným naměřeným bodům (Křikavová, 2009). Tento princip je patrný z obrázku 6, kde bodu X1 bude přiřazena hodnota bodu P1, neboť tento bod se nachází k bodu X1 nejbližší. Obdobně by hodnotu bodu P1 získaly všechny body spadající do žlutého polygonu, který bod P1 obklopuje.



**Obr. 6 Princip Thiessenových polygonů**

(zdroj: [resources.esri.com/help/9.3/ArcGISEngine/java/Gp\\_ToolRef/geoprocessing/GPKAC\\_thiessen.gif](http://resources.esri.com/help/9.3/ArcGISEngine/java/Gp_ToolRef/geoprocessing/GPKAC_thiessen.gif)  
vlastní úprava)

Thiessenovy polygony jsou poměrně jednoduché na tvorbu. Nejprve jsou zkonstruovány spojnice sousedních měřených bodů. Následně jsou v polovině vzdálenosti mezi spojenými body vztyčeny kolmice a vznikne tak síť polygonů, které se nazývají Thiessenovy. Výsledkem je nepravidelná síť konvexních polygonů, které mají různý počet stran. Vzniklé Thiessenovy polygony jsou zobrazeny na obrázku 7 tučně, kde je patrné, že kolmice vztyčené v polovině spojnice sousedních bodů tvoří strany Thiessenových polygonů.



**Obr. 7 Thiessenovy polygony**

(zdroj: <http://www.geo.hunter.cuny.edu/~rdatta/gis2/lectures/lecture6/delan.gif>)

Typickou vlastností Thiessenových polygonů je, že jsou založeny pouze na jedné hodnotě. Zkoumaný spojitý jev tak bude mít diskrétní strukturu. Další typickou vlastností je to, že polygony okrajových bodů mají v podstatě nekonečnou plochu. Musí být tedy ořezány hranicemi určitého území.

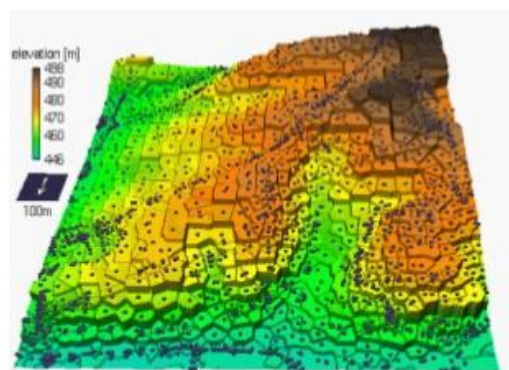
Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, Thiessenovy polygony jsou základem metod nejbližšího souseda a přirozeného souseda. Tyto metody jsou popsány

v dalších kapitolách a společně s metodou nejbližšího souseda je popsána i použitelnost Thiessenových polygonů pro účely batymetrie.

#### **4.2.1.2 Nearest Neighbor – metoda nejbližšího souseda**

Metoda nejbližšího souseda je postavena na principu Thiessenových polygonů, které jsou popsány v předchozí kapitole. Metoda předpovídá hodnotu atributu nezměřeného bodu na základě hodnoty bodu, který je danému místu nejbliže. Body v každém polygonu jsou nejbliže měřenému bodu uvnitř tohoto polygonu, nejsou blíže jiným naměřeným bodům (Isaaks and Srivastava, 1989; Ripley, 1981; Webster Oliver, 2001 in Li, Heap, 2008). Všem bodům v rámci každého polygonu je přiřazena stejná hodnota (Ripley, 1981; Webster, Oliver, 2001 in Li, Heap, 2008).

Na obrázku 8 je zobrazen výsledný povrch vytvořený metodou nejbližšího souseda. Jak je z tohoto obrázku patrné, tato metoda je pro tvorbu batymetrických map zcela nevhodná. Je to z toho důvodu, že metoda nejbližšího souseda generuje okolo každého bodu oblast, již je přiřazena stejná hodnota, jakou má bod ležící uvnitř této oblasti, což generuje nespojité plochy. U dna vodní plochy lze však předpokládat, že toto bude plocha spojitá.



**Obr. 8 Metoda nejbližšího souseda**

(zdroj: [http://gis.uster.ch/dienstleistungen/analyse/thiessen\\_polygon\\_gelndehhe.jpg](http://gis.uster.ch/dienstleistungen/analyse/thiessen_polygon_gelndehhe.jpg))

#### **4.2.1.3 Natural Neighbor – metoda přirozeného souseda**

Metoda přirozeného souseda byla poprvé zavedena Sibsonem v roce 1981 a spojuje v sobě nejlepší vlastnosti metod Nearest Neighbor a TIN (Webster, Oliver, 2001 in Li, Heap, 2008). Tato metoda využívá pro určení vah Thiessenovy polygony. Pokud vložíme interpolovaný bod do sítě Thiessenových polygonů, způsobí to její přebudování v okolí daného bodu. Vzniknou tak dvě sítě polygonů – síť původní a síť nová, která vznikla přidáním určovaného bodu. Výsledkem je, že polygon nového bodu překrývá

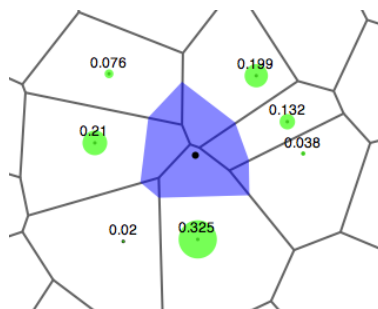
některé části polygonů původních známých bodů. Dané body, jejichž polygony jsou překryty polygonem novým, se nazývají přirození sousedé a budou zahrnuty do interpolace nového bodu. Vahami při interpolační metodě přirozeného souseda jsou plochy, jež byly odděleny z původních polygonů jednotlivých sousedů.

$$A(p) = \sum_{i=1}^n A_i \quad \lambda_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

$A_i$  ve vzorci reprezentuje část plochy původního polygonu přirozeného souseda  $i$ . Plocha polygonu nového bodu  $p$  je označena  $A(p)$ . Lambda je poměr části plochy polygonu původního vůči ploše polygonu nového (Křikavová, 2009). Na obrázku 9 jsou váhy reprezentovány desetinnými čísly a výsledná interpolovaná hodnota se vypočítá podle vzorce:

$$G(x, y) = \sum_{i=1}^n \lambda_i f(x_i, y_i)$$

kde  $\lambda_i$  jsou váhy a  $f$  jsou hodnoty v jednotlivých polygonech. Výsledný odhad  $G$  je tedy suma násobků vah s hodnotami v jednotlivých polygonech.

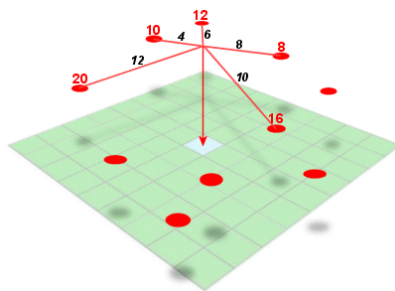


**Obr. 9 Metoda přirozeného souseda**

(zdroj: [http://en.wikipedia.org/wiki/Natural\\_neighbor#mediaviewer/File:Natural-neighbors-coefficients-example.png](http://en.wikipedia.org/wiki/Natural_neighbor#mediaviewer/File:Natural-neighbors-coefficients-example.png))

Metoda přirozeného souseda je velice efektivní, jestliže jsou naměřené hodnoty pravidelně rozmístěny. Výsledná struktura modelovaného jevu je spojitá, vyhlazená a neobsahuje extrapolované hodnoty (Křikavová, 2009). Pro zpracování batymetrických map by mohla být metoda přirozeného souseda vhodná, pokud jsou hodnoty rozmístěny pravidelně.

#### 4.2.1.4 Inverse Distance Weighting (IDW)



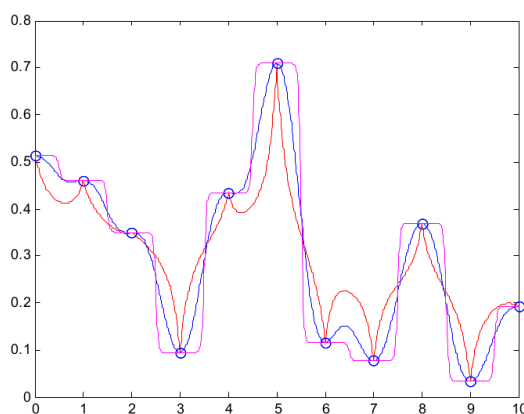
**Obr. 10 Inverse Distance Weighting**

(zdroj: [www.geography.hunter.cuny.edu/~jochen/GTECH361/lectures/lecture10/3Dconcepts/Inverse%20Distance%20Weighted\\_files/image001.gif](http://www.geography.hunter.cuny.edu/~jochen/GTECH361/lectures/lecture10/3Dconcepts/Inverse%20Distance%20Weighted_files/image001.gif))

Metoda IDW patří mezi nejjednodušší a přitom často používané metody interpolace a je založena na použití váženého průměru. Jeho váhy jsou nepřímo úměrné mocnině vzdálenosti (Ježek, 2008). Metoda funguje na principu, že jevy, které si jsou v prostoru blíže, se více podobají, než jevy, které jsou vzdálenější. Odhad IDW se provádí podle vzorce:

$$G_0 = \frac{\sum_{i=1}^s z_i \frac{1}{d_i^\alpha}}{\sum_{i=1}^s \frac{1}{d_i^\alpha}}$$

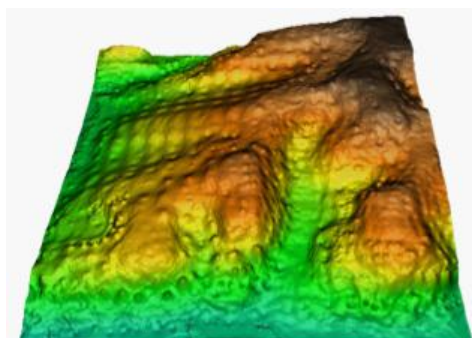
Kde  $G_0$  je neznámá odhadovaná hodnota,  $z_i$  je známá hodnota v bodě  $i$ ,  $d$  je vzdálenost mezi bodem  $i$  a bodem  $z_0$ . Parametr  $\alpha$  reprezentuje mocninu. Výpočet IDW můžeme modifikovat pomocí nastavení různé hodnoty této mocniny. Běžně volí 1, 2 nebo 3 a v závislosti na velikosti tohoto parametru dostáváme lehce odlišné výsledky. Se zvětšující se mocninou (parametrem) roste zároveň vliv nejbližšího naměřeného bodu. To dokumentuje obrázek 11, níže, kde byl parametr zvolen  $\alpha = 1, 2, 10$  a jsou zde zachyceny rozdíly ve 2D prostoru. Z obrázku je zřejmé, že IDW pro parametr 1 (červená barva) produkuje špičky v interpolovaných bodech, kdežto křivka pro druhou mocninu (modrá barva) je hladší. V praxi se velké hodnoty  $\alpha$  nepoužívají. Případ  $\alpha = 10$  (fialová barva) je vykreslen pro lepší demonstraci toho, že pokud zvolíme vysoké  $\alpha$ , pak metoda IDW přechází na metodu nejbližšího souseda, kdy se do interpolovaného bodu dosazuje hodnota nejbližší naměřená (Ježek, 2008).



**Obr. 11 Charakter IDW pro  $\alpha = 1, 2$  a  $10$  (červená, modrá, fialová křivka)**

(zdroj: Ježek, 2008)

Protože vstupní body mají poměrně silný vliv při výpočtu interpolace, často v jejich okolí vznikají tzv. bull eyes, což jsou koncentrické izolinie (Křikavová, 2009). Bull eyes jsou zachyceny na obrázku 12, kde je jasně vidět výše popsáný vliv vstupních bodů. Vzhledem k tomuto problému není metoda IDW příliš vhodná pro vytváření batymetrických map.



**Obr. 12 Bull eyes**

(zdroj: [http://docs.qgis.org/testing/en/\\_images/idw\\_interpolation.png](http://docs.qgis.org/testing/en/_images/idw_interpolation.png))

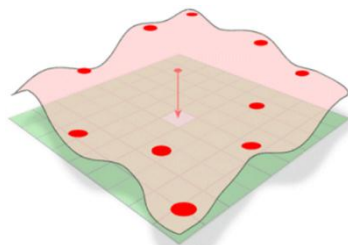
Charakteristickou vlastností této metody je to, že nedokáže odhadnout hodnoty vyšší nebo nižší, než jsou hodnoty naměřených dat. To znamená, že pokud nemáme naměřeny hodnoty v extrémech, pak je metoda IDW nedokáže odhadnout a tudíž zde dochází ke zkreslení. Při výpočtu výškových povrchů to má za následek zploštění vrcholů a údolí (pokud nejsou nejvyšší a nejnižší hodnoty na daném území součástí vzorku). IDW je dobrá interpolační metoda pro jevy, jejichž rozložení v prostoru je úzce spjato se vzdáleností. Klasickým příkladem je zvuk, který se vzrůstající vzdáleností předvídatelně slábne. Tato metoda se však již méně hodí pro jevy, jejichž distribuce je závislá na složitějších sadách proměnných, protože je vypočítávána pouze na základě



vzdáleností. Potenciální výhoda IDW je v tom, že nám dává explicitní kontrolu nad vlivem vzdálenosti. Výhoda, kterou nemáme u metod Spline či Kriging. Hladší povrch se může vytvořit snížením parametru, zvýšením počtu použitých bodů pro výpočet nebo zvětšením použitého poloměru neboli radiusu. Radius reprezentuje poloměr kruhu, ve kterém se nachází body, které se použijí pro odhad výsledné hodnoty interpolace IDW.

Metoda IDW je pro vytváření batymetrických map nevhodná, pokud nemáme ve vzorku dat změřeny hodnoty v extrémech, pak je metoda IDW nedokáže odhadnout. Jedním z dalších důvodů nevhodnosti metody IDW pro vytváření batymetrických map je také problém bull eyes v okolí vstupních bodů. V batymetrii se často měří v příčných profilech, což je příčinou následného nesymetrického rozložení vstupních bodů pro odhad interpolace. Při odhadu metodou IDW mají body blízko sebe obrovský vliv na výslednou hodnotu. Proto metodu nelze doporučit, pokud nejsou body rozmístěny pravidelně. Nelze ani předpokládat, že by dno vodní plochy bylo natolik monotónní, aby šlo charakterizovat podobně jako zvuk, který ze vzdáleností slábne. A tudíž je metoda IDW pro interpolaci jezer nevhodná.

#### **4.2.1.5 Spline**



**Obr. 13 Spline**

*(zdroj: Křikavová, 2009)*

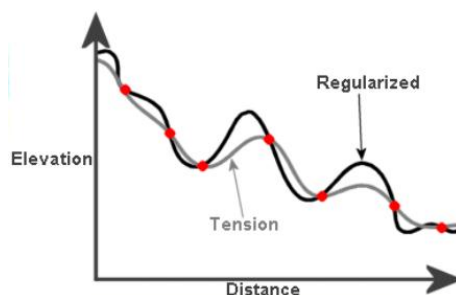
Metoda Spline je založena na principu odhadu neznámých hodnot pomocí matematických funkcí. Při použití této metody musí být splněny dvě podmínky - matematická funkce prochází měřenými body a má minimální křivost. Spline prakticky zaručí hladce vypadající povrch (Křikavová, 2009). Ježek (2008) přirovnává Spline k ocelovému prutu či plechu proloženému naměřenými body. Vzhledem k tomuto efektu proložení je tato metoda vhodná, pokud chceme odhadnout hodnoty pod naměřeným minimem a nad naměřeným maximem určitého vzorku dat. U metody Spline je každá část povrchu mezi dvěma body definována samostatnou polynomičkou

funkcí (Press a kol, 1988). Zároveň však musí platit, že sousední polynomické funkce budou spojité, budou procházet naměřenými body a v případě kubických polynomů budou mít totožné první dvě derivace (Wolberg, 1988). Funkce Spline se matematicky zapisuje tímto vzorcem:

$$G(s) = T(s) + \sum_{i=1}^n v_i R(r_i)$$

„Kde  $T(s)$  je polynomická funkce,  $v_i$  jsou neznámé koeficienty měřených bodů,  $R(r_i)$  je Radial Basis Function (radiální základní funkce), která závisí na vzdálenosti  $r_i$ . Což je vzdálenosti mezi bodem  $s = f(x,y)$  a  $i$ -tým měřeným bodem. Počet měřených bodů se označuje  $n$ . Funkce  $T(s)$  a  $R(r_i)$  jsou voleny různě na základě typu metody Spline“ (Křikavová, 2009). Místo označení Spline se často používá zkratka RBF – Radial Basis Function. RBF neboli Spline se může dále dělit na: Thin Plate Spline (TPS), Regularized Spline a Tension Spline.

Thin Plate Spline (TPS) je základní formou Spline. Vzhledem k tomu, že se v jeho první derivaci povrchu (sklon) mohou vyskytovat prudké změny v okolí měřených bodů, není vhodný pro odhad druhé derivace povrchu (křivost) (Křikavová, 2009). Regularized Spline určuje váhu třetí derivace povrchu při minimalizaci křivosti. Vyšší váha v praxi znamená menší křivost a tudíž i hladší povrch. Tension Spline udává váhu první derivace povrchu při minimalizaci křivosti (Letko, 2013). Vyšší váha znamená hrubší povrch, ale je-li váha rovna nule, pak jde o Thin Plate Spline (Křikavová, 2009). Tension Spline je plošší než Regularized Spline stejného vzorku dat, protože při výpočtu jsou jeho odhadované hodnoty blíže naměřeným datům, o čemž vypovídá obrázek 14.



**Obr. 14 Regularized Spline vs. Tension Spline**

(zdroj: [geography.hunter.cuny.edu/~jochen/GTECH361/lecture10/3Dconcepts/Spline\\_files/image002.gif](http://geography.hunter.cuny.edu/~jochen/GTECH361/lecture10/3Dconcepts/Spline_files/image002.gif))

Dalo by se říci, že výsledný povrch vytvořený pomocí Tension Spline je více „tuhý“ (méně flexibilní), zatímco povrch vytvořený s Regularized Spline je více elastický.

Metoda Spline v porovnání s metodou IDW dokáže odhadnout vyšší a nižší hodnoty, než jsou hodnoty vstupních bodů. Pokud tedy nemáme naměřeny hodnoty v extrémních místech, tato metoda je dokáže odhadnout. Další rozdíl mezi IDW a Spline je ten, že u metody Spline podléhají interpolovaná místa podmínce co nejhladšího povrchu, a u IDW závisí interpolovaná místa na váženém průměru z okolních bodů (Křikavová, 2009). Nevýhodou metody Spline je, že pokud máme ve vzorku dat blízko sebe hodnoty s extrémními rozdíly, jako například útesy, tak metoda Spline nefunguje zcela správně, protože se snaží daná místa plynule spojit, ale výsledek neodpovídá realitě.

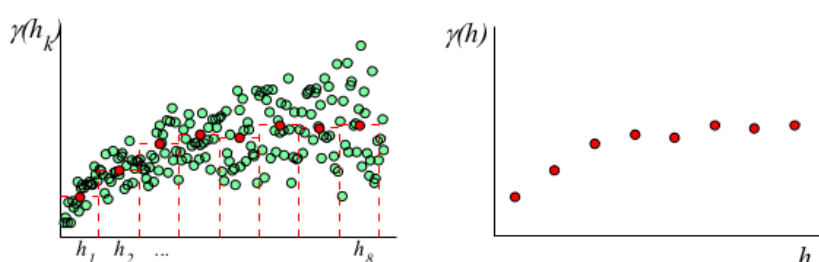
Interpolační metoda Spline by se při nalezení vhodného nastavení mohla dobře hodit pro vytvoření batymetrické mapy vodní plochy. Jejím největším nedostatkem je to, že nedokáže věrně vystihnout náhlé změny tvaru dna, pokud máme naměřené extrémní hodnoty blízko sebe. Tomu by se však v GIS softwaru dalo zamezit nastavením bariér (viz. kapitola 4.3.4).

#### **4.2.1.6 Kriging**

Na úvod je třeba podotknout, že plnohodnotné vysvětlení Krigingu dalece přesahuje rámec této bakalářské práce. Podrobným popisem fungování této metody se zabývá například Isaaks, Srivastava (1989), Stein (1999), Bohling (2005), Ježek (2008), případně Chilès, Delfiner (2012) a mnoho dalších. Jelikož například Li, Heap (2008) rozlišují 22 druhů Krigingu, nelze zde s ohledem na téma bakalářské práce popsat fungování všech těchto podob. Bude zde naznačeno fungování pouze nejjednodušší podoby Krigingu, tedy Ordinary Krigingu. Tento druh Krigingu předpokládá konstantní střední hodnotu v celé oblasti. A tato střední hodnota je neznámá.

Podle Ježka (2008) je Kriging „geostatistická metoda odhadu prostorové proměnné založená na váženém průměru. Tyto váhy jsou spočteny na základě variogramu vyjadřujícího vlastnosti prostorové proměnné“. Variogram podává informaci o tom, jak se mění rozdíly mezi hodnotami dané veličiny v závislosti na rostoucí vzdálenosti. Rozdíly mezi hodnotami v naměřených bodech charakterizuje proměnná  $d$ , což je míra nepodobnosti hodnot veličiny. Tuto nepodobnost můžeme

vypočítat pro všechny dvojice bodů a vykreslit ji do grafu, kde je na ose x vynesena vzdálenost mezi body a na ose y tato nepodobnost. Výsledný graf se nazývá variogram mrak. Variogram mrak je na obrázku 15 zobrazen zelenými body. Osa x je rozdělena podobně jako při tvorbě histogramu na stejně velké intervaly, v nichž je spočtena „průměrná nepodobnost“, jež je přiřazena středům těchto intervalů (Ježek, 2008). Na obrázku 15 je tato „průměrná nepodobnost“ zobrazena červenou barvou. Výsledek patrný z tohoto obrázku vpravo se nazývá empirický variogram.



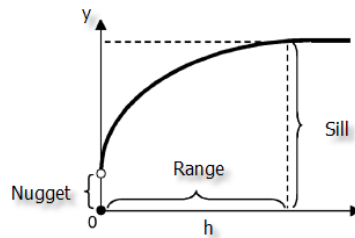
**Obr. 15 Variogram mrak, empirický variogram**

(zdroj: Ježek, 2008)

Empirický variogram se počítá podle vzorce:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2$$

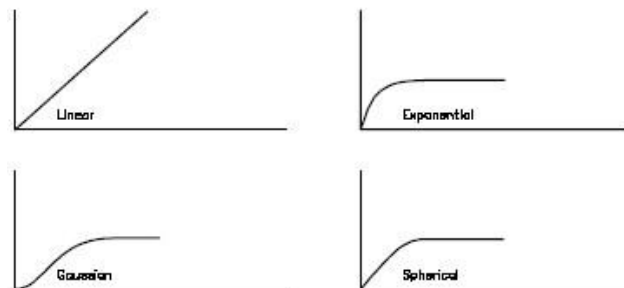
kde  $h$  značí vzdálenost středů jednotlivých intervalů,  $N(h)$  je počet intervalů a rozdíl  $z(x_i+h)-z(x_i)$  vyjadřuje všechny dvojice bodů patřící do určitého intervalu (Ježek, 2008). Body tvořící empirický variogram mohou být proloženy linií definovanou matematickou funkcí a tvoří tak určitý model variogramu. Tento model může být charakterizován pomocí tří základních parametrů Nugget, Range a Sill (Lassiter, 2014), jež jsou patrné z obrázku 16. Range (dosah variogramu) je vzdálenost, od které již nejsou hodnoty korelovány, Sill (práh variogramu) je hodnota odpovídající dosahu variogramu na ose y a je rovna rozptylu dat. Variogram pro hodnotu 0 by měl vycházet z počátku soustavy souřadnic, ale to nemusí vždy platit. Může nastat tak zvaný Nugget effect. Tento efekt vyjadřuje „mikrovariabilitu“ prostorové veličiny, což je chápáno jako variabilita na kratší vzdálenosti než je vzdálenost nejbližších bodů, u nichž bylo provedeno měření. Případně může být Nugget effect způsoben chybou měřicího přístroje či metody (Ježek, 2008).



**Obr. 16 Nugget, Range, Sill**

zdroj: [www.supermap.com/EN/Objects%20Java%206R/ProgrammingReference/resources/Krig\\_sill.png](http://www.supermap.com/EN/Objects%20Java%206R/ProgrammingReference/resources/Krig_sill.png)

Modelů variogramů může být celá řada. Podle Lassiter (2014) jsou nejčastěji používanými lineární, exponenciální, gaussovský a sférický. Všechny čtyři jsou zobrazeny na obrázku 17.



**Obr. 17 Modely variogramů**

(zdroj: [http://www.transport.polymtl.ca/civ1120/quicksurf\\_manual/639.gif](http://www.transport.polymtl.ca/civ1120/quicksurf_manual/639.gif) vlastní úprava)

Poté, co je známa prostorová autokorelace – byl vytvořen model semivariogramu můžeme přistoupit k prostorové predikci. Nejprve k určení vah Krigingu a následně na základě těchto vah k výpočtu prostorového modelu (Křikavová, 2009). Soustava rovnic krigingu se v maticové podobě zapisuje následujícím způsobem:

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{22} & 0 & \dots & \gamma_{2n} & 1 \\ & & \dots & & \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \dots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Kde je  $\gamma_{ij} = \gamma(x_i - x_j)$  a  $\gamma_{i0} = \gamma(x_i - x_0)$

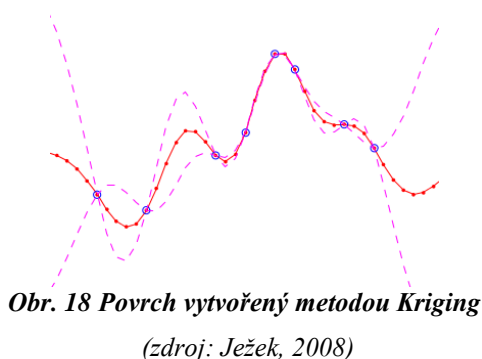
a  $\gamma$  reprezentuje body ve variogramu. Pokud je známý model variogramu, pak na základě této soustavy rovnic Krigingu vypočteme váhy  $\lambda_i$  a Lagrangeův multiplikátor  $\mu$ .

Lagrangeův multiplikátor slouží pro hledání extrémů funkce při splnění určité vedlejší podmínky. Jakmile máme vypočtenou soustavu rovnic Krigingu, dosadíme váhy do vzorce:

$$G_0 = \sum \lambda_i z_i$$

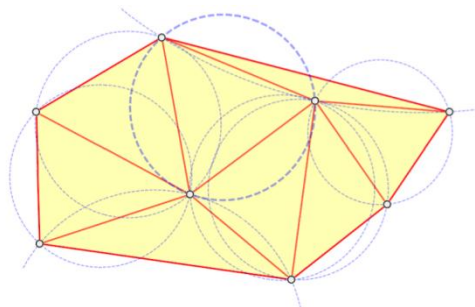
kde,  $G_0$  je hledaný odhad,  $\lambda_i$  jsou váhy jednotlivých hodnot a  $z_i$  jsou známé hodnoty. A dostáváme výsledný odhad (Ježek, 2008).

Metoda Kriging by mohla být vhodná pro tvorbu batymetrických map, jelikož jsou váhy spočteny na základě autokorelace a ne pouze na základě například vzdálenosti, jako je tomu u metody IDW. Jak je zřejmé z obrázku 18, Kriging je exaktní interpolátor, protože prochází naměřenými body a tudíž by mohl být použit při tvorbě batymetrické mapy. Růžovou barvou je na obrázku zobrazen 95% interval spolehlivosti.



#### 4.2.2 TIN – Triangulated Irregular Network

Neboli nepravidelná trojúhelníková síť se v systémech (GIS) používá k reprezentaci povrchu a je tvořena trojúhelníky, které vznikly triangulací. Jsou nepravidelně uspořádány a dohromady vytváří celistvou trojúhelníkovou síť. TIN nejčastěji vzniká pomocí Delaunay triangulace, která je možná ve 2D i 3D prostoru. Podle Bayera (2008) je Delaunay triangulace tvořena trojúhelníky tak, že uvnitř libovolného trojúhelníku neleží žádný jiný bod. Tato triangulace maximalizuje minimální úhel, avšak neminimalizuje maximální úhel. Dále je Delaunay triangulace jednoznačná v případě, že žádné čtyři body neleží na stejné kružnici a snaží se vytvořit trojúhelníky tak, aby byly co nejvíce rovnostranné. Ukázka triangulované sítě pomocí této metody je na obrázku 19.



**Obr. 19 Delaunay triangulace**

(zdroj: [www.stavby.com/stavebni-blog/article/26-import-bod-terenu-do-archicadu-13-pomoci-gdl.html](http://www.stavby.com/stavebni-blog/article/26-import-bod-terenu-do-archicadu-13-pomoci-gdl.html))

TIN velmi dobře reprezentuje nerovnosti terénu a to hlavně z toho důvodu, že jeho body jsou nepravidelně rozmístěny, tudíž v oblastech s plochým povrchem může mít méně bodů a naopak ve velmi členitých oblastech bodů více, které věrně vystihují charakter terénu (Štych, 2008)

Při vzniku batymetrické mapy by se metoda triangulace a tvorby TIN mohla uplatnit. TIN by se však mohl použít pouze tehdy, pokud by bylo k dispozici velké množství naměřených bodů, které by byly pravidelně rozmístěny po celé ploše jezera.

### 4.2.3 Hodnocení kvality interpolace

Zhodnocení toho, jak přesně interpolace proběhla je velmi důležité. Při tvorbě batymetrických map lze kvalitu interpolace hodnotit subjektivně z výsledné podoby mapy. Mnohem vhodnější jsou však metody statistické, které nám také dokáží určit hodnotu, která udává přesnost, s jakou byla daná interpolační metoda provedena. Přesnost výsledné interpolace lze získat použitím validace (Validation) nebo Cross-Validation.

Při validaci je nutné disponovat částí dat, jež nebyly použity pro odhad interpolace. Těmito daty se poté výsledný odhad otestuje. Jak píše Křikavová (2009), v mnoha případech je množství naměřených dat příliš malé na to, aby se mohla pro ověření a zjištění kvality interpolace použít metoda validace. Z tohoto důvodu se pro hodnocení interpolace používá spíše metoda Cross-Validation, která je stručně popsána v následující podkapitole.

#### 4.2.3.1 Cross-Validation

Česky také metoda křížového ověřování (Theuer, 2012) se často používá v případě, že chceme zvolit vhodnou interpolační metodu pro aplikaci na naše data, případně jsme vyzkoušeli různé interpolační metody a chceme určit, která z nich je nejpřesnější pro daný typ problému.

Metoda je založena na principu odstranění jednoho bodu o známé hodnotě z původního vzorku dat, kdy je následně provedena interpolace ze zbývajících bodů a je počítán rozdíl mezi hodnotou původní a hodnotou odhadnutou ze zbytku dat. Tímto způsobem se postupuje do té doby, dokud nebyl každý bod takto odstraněn a nebyla odhadnuta jeho hodnota. Výsledkem Cross-Validation je střední polohová chyba (RMSE – Root Mean Square Error). (Davis, 1987; Song and DePinto, 1995 in Tomczak, 1998).

Tato střední polohová chyba se počítá podle vzorce:

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

kde  $n$  je počet bodů použitých při výpočtu a  $\sigma$  je rozdíl mezi odhadovanou hodnotou a skutečnou hodnotou v daném místě (McGwire, 1996).

### 4.3 Geoinformatické zpracování v softwaru ArcGIS

Geoinformační technologie jsou velice progresivně se rozvíjejícím oborem a firma ESRI se jimi dlouhodobě velmi úspěšně zabývá. Z tohoto důvodu bude pro tvorbu batymetrické mapy použit jejich software ArcGIS a jeho extenze ArcMap. ArcGIS obsahuje velké množství funkcí, které se můžou aplikovat na naměřené hodnoty tak, abychom dospěli k co nejpřesnějším výsledkům. Program obsahuje mnoho nadstaveb (*Extensions*), které se specializují na interpolace bodových dat. Řadíme sem *3D Analyst*, *Spatial Analyst* a *Geostatistical Analyst*.



Metody, jejichž obecný princip je popsán v kapitole 4.2 budou nyní aplikovány na naměřené bodové hodnoty hloubek a bude ukázána jejich vhodnost, případně nevhodnost při vzniku batymetrické mapy. Jako modelové jezero bylo zvoleno Čertovo jezero na Šumavě a jednotlivé metody budou ukázány na výřezu jeho částí. U jednotlivých metod byla vždy plocha výsledného rastru ořezána břehovou linií pomocí funkce *Extract by Mask*, aby byl patrný výsledek pouze v rámci jezera a rastr nezasahoval i mimo něj. Princip fungování funkce *Extract by Mask* je zobrazen na obrázku 20.

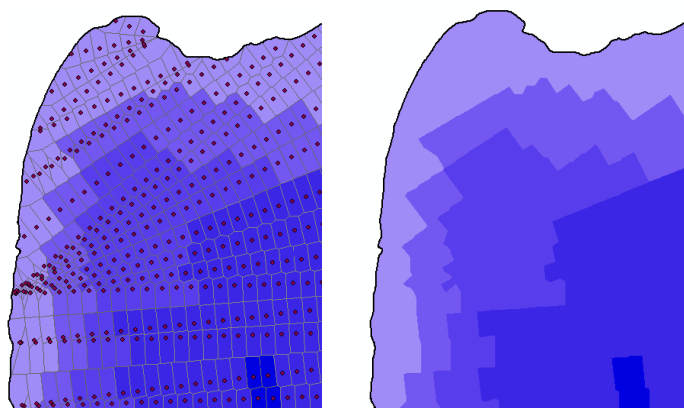


**Obr. 20 Extract by Mask**

(zdroj: [resources.esri.com/help/9.3/arcgisengine/javatool/ref/geoprocessing/Extract\\_by\\_mask.gif](https://resources.esri.com/help/9.3/arcgisengine/javatool/ref/geoprocessing/Extract_by_mask.gif))

### 4.3.1 Metoda nejbližšího souseda

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2.1.2 při popisu principu metody nejbližšího souseda, tato metoda je pro znázorňování hloubek vodních ploch zcela nevhodná. Spojité dno vodní plochy bude reprezentováno diskrétní strukturou, což neodpovídá skutečnému rozložení hloubek v dané vodní ploše. Tato skutečnost je zobrazena na obrázku 21, kde jsou vedle sebe ukázky výřezu Čertova jezera vizualizované pomocí funkce nejbližšího souseda. Na obrázku vlevo jsou vidět Thiessenovy polygony (viz. kapitola 4.2.1.1), které ohraničují naměřené body. Všem bodům v rámci daného polygonu je přiřazena stejná hodnota. Na obrázku vpravo již je výsledný povrch znázorněn bez ohraničených Thiessenových polygonů.

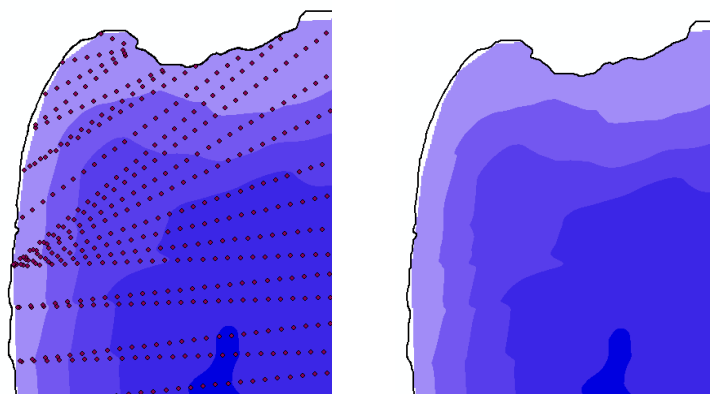


**Obr. 21 Metoda nejbližšího souseda**

(zdroj: vlastní)

### 4.3.2 Metoda přirozeného souseda

Metoda přirozeného souseda, jejíž princip je popsán v kapitole 4.2.1.3 se může v batymetrii uplatnit, pokud jsou hodnoty rozmístěny pravidelně. Tato metoda je podobně jako metoda nejbližšího souseda úzce spjata s Thiessenovými polygony. Tato souvislost je popsána v kapitole 4.2.1.1. Aby Thiessenovy polygony na obvodu zájmového území netvořily nekonečnou plochu, vytvoří se při metodě přirozeného souseda konvexní n-úhelník, jenž všechny naměřené body ohraničuje. Interpolace proběhne pouze v rámci této plochy, na rozdíl od ostatních metod, kdy je výsledkem obdélníkový rastr i s extrapolovanými oblastmi (Křikavová, 2009). Na obrázku 22 je již konvexní n-úhelník vytvoření interpolační metodou přirozeného souseda oříznutý podle břehové linie pomocí funkce *Extract by Mask*. Bílá místa v rámci jezera jsou již zmiňované Thiessenovy polygony oříznuté konvexním n-úhelníkem a tato místa vyžadují dodatečnou editaci pro vytvoření kartograficky korektní batymetrické mapy.



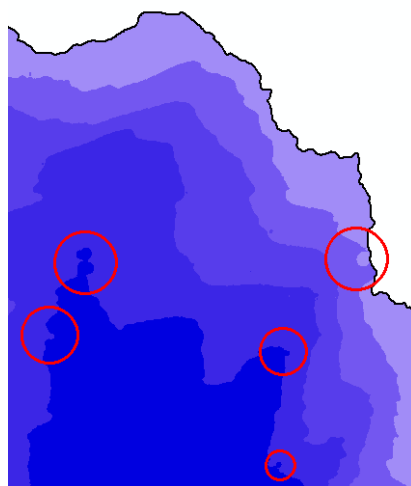
**Obr. 22 Metoda přirozeného souseda**

(zdroj: vlastní)

### 4.3.3 IDW

Principy fungování metody IDW a její obecný popis jsou uvedeny v kapitole 4.2.1.4. V Prostředí ArcGIS je u metody IDW možné nastavit několik parametrů, které mohou ovlivnit výsledný odhad interpolace. Jedním z parametrů je koeficient  $\alpha$  (Power). Vliv koeficientu alfa na odhad interpolace IDW je detailně popsán v již zmiňované kapitole 4.2.1.4. Dalším parametrem, který je možné nastavit je poloměr kruhu, v němž se nachází body, které se použijí pro odhad interpolace IDW. Může se zvolit poloměr proměnný (Variable), případně pevný (Fixed). U proměnného poloměru se nastavuje počet nejbližších vstupních bodů, které se použijí při odhadu interpolace. Dále se u proměnného poloměru nastavuje maximální vzdálenost, v níž se mají nacházet nejbližší vstupní body. U pevného poloměru se nastavuje vzdálenost, ve které se nachází body, jenž budou použity pro odhad interpolace IDW. Dále se nastavuje minimální počet bodů využitých při odhadu interpolace. Mohou se také nastavit bariéry, pomocí nichž můžeme definovat limity pro hledání vstupních bodů v dané oblasti.

Jak je již uvedeno u obecného popisu této metody, metoda IDW není vhodná pro tvorbu batymetrické mapy. Hlavním důvodem je problém koncentrických izolinií v okolí vstupních bodů, tak zvaných bull eyes. Metoda IDW je v okolí vstupních bodů vytvoří z toho důvodu, že vstupní body mají poměrně silný vliv při výpočtu interpolace. Na obrázku 23 jsou ukázky některých bull eyes zvýrazněny červeně.



**Obr. 23 Metoda IDW**

(zdroj: vlastní)

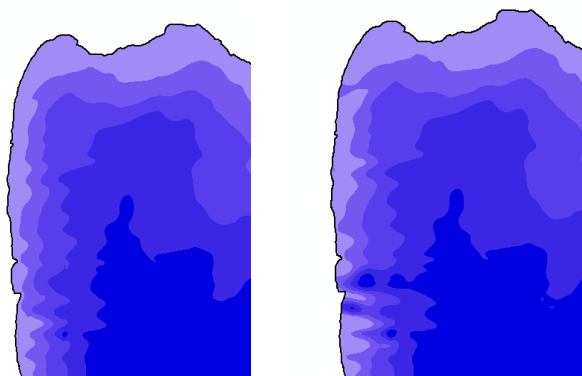
Další charakteristickou vlastností metody IDW, kvůli které není vhodná pro využití při tvorbě batymetrických map je, že nedokáže odhadnout hodnoty vyšší nebo nižší, než obsahuje naměřený vzorek dat. Pokud tedy nemáme změřeny hloubky v nejhlubších místech, pak metoda IDW nevystihne morfologii dna vodní plochy zcela korektně.

#### 4.3.4 Spline

Podstata metody Spline je popsána v kapitole 4.2.1.5. V prostředí ArcGIS si můžeme zvolit funkci Spline, případně *Spline with barriers*, kde si podobně jako u metody IDW můžeme nastavit bariéry, díky kterým se provede interpolace Spline pouze v určitých místech.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2.1.5., interpolace Spline prochází měřenými body a má minimální křivost. V prostředí ArcGIS máme v základním nastavení na výběr dva typy – Regularized Spline nebo Tension Spline. U obou těchto typů se nastavuje počet bodů, jež se použijí k výpočtu odhadu interpolace. Dále se nastavuje parametr váhy. U Regularized Spline představuje parametr váhy váhu třetí derivace povrchu při minimalizaci křivosti (Křikavová, 2009). Standardní hodnota parametru váhy je 0,1, ale může nabývat hodnot od 0 do 1. Čím větší hodnota váhy se zvolí, tím bude výsledný povrch hladší. U Tension Spline se nastavují hodnoty váhy větší nebo rovné nule, čím větší váha se použije, tím bude výsledný povrch členitější. Nejčastěji jsou používány hodnoty 0, 1, 5, 10 (Křikavová, 2009).

Po aplikaci funkcí Tension Spline a Regularized Spline na bodová data hloubek Čertova jezera se projevil hlavní rozdíl mezi těmito dvěma metodami přesně podle toho, jak ukazuje obrázek 14 v kapitole 4.2.1.5. Výsledný povrch u Tension Spline více přimyká naměřeným hodnotám, což je zřejmé z obrázku 24 níže - Tension Spline je na obrázku vlevo, Regularized Spline vpravo. Z obou obrázků je patrné, že je výsledný povrch velmi silně ovlivněn profily, v nichž jsou měřeny hloubky (profily jsou znázorněny například na obrázku 22 u metody přirozeného souseda). Kvůli tomuto měření v profilech jsou výsledné izoplety silně zvlněny a dno jezera by tedy na základě toho muselo být velmi členité a často skokově měnit svůj průběh, což neodpovídá realitě.



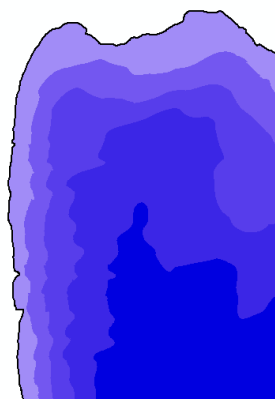
**Obr. 24 Tension Spline vs. Regularized Spline**

(zdroj: vlastní)

### 4.3.5 Kriging

Jak je popsáno v kapitole 4.2.1.6, Kriging předpokládá, že vzdálenost nebo směr mezi naměřenými body odráží prostorová korelace, která může být užita k popisu modelu terénu. Kriging matematicky definuje funkci popisující určitý počet bodů nebo všechny body v dané vzdálenosti (poloměru) a následně je použije k odhadu výsledné hodnoty. Poloměr (Radius) může být pevný (Fixed) nebo proměnný (Variable). V kapitole 4.2.1.6 je zmíněno, že forem Krigingu je celá řada. Nejčastěji využívaným druhem Krigingu je Ordinary Kriging, jež předpokládá neznámou (ale konstantní) střední hodnotu v celé oblasti. Druhou variantou Krigingu, kterou máme na výběr v prostředí ArcGIS je Universal Kriging, jež uvažuje lokálně proměnný trend stejného typu v celé oblasti (Childs, 2004).

Hloubkové poměry Čertova jezera vizualizované pomocí metody Ordinary Kriging jsou znázorněny na obrázku 25. Výsledný povrch je spojitý a hladký. Metoda Kriging bude zřejmě vhodná pro tvorbu batymetrických map i jezer jiných genetických typů.

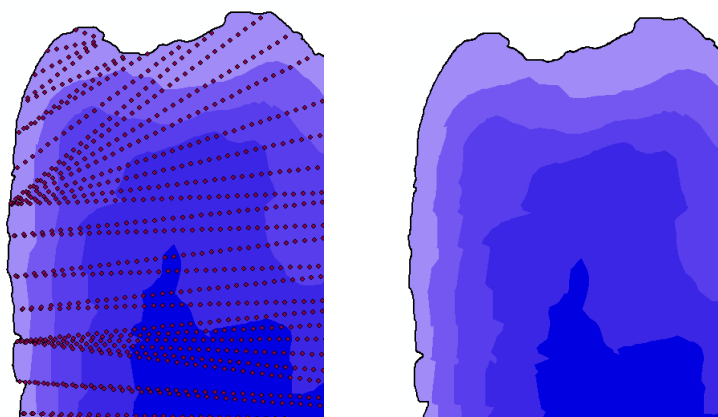


**Obr. 25 Ordinary Kriging**

(zdroj: vlastní)

### 4.3.6 TIN

V obecném popisu metody v kapitole 4.2.2 je uvedeno, že by se mohla metoda TIN použít pro tvorbu batymetrické mapy, pokud by byly hodnoty naměřených hloubek po dané vodní ploše rozmístěny pravidelně. Při pohledu na obrázek 26 je však zřejmé, že naměřených bodů je po celé ploše Čertova jezera sice velké množství, avšak měření byla prováděna v příčných profilech stále ve stejném směru a u hodnot blízko břehové linie si je mnoho bodů velmi blízkých. Tyto body pak ve výsledném povrchu reprezentovaném TINem vytváří dojem, který neodpovídá skutečnému rozložení hloubek v dané vodní ploše, a proto nelze metodu TIN doporučit pro tvorbu batymetrické mapy. I pokud se takto vzniklý povrch převede na rastr, není výsledek natolik dostačující, aby mohla být tato metoda doporučena pro tvorbu batymetrických map.

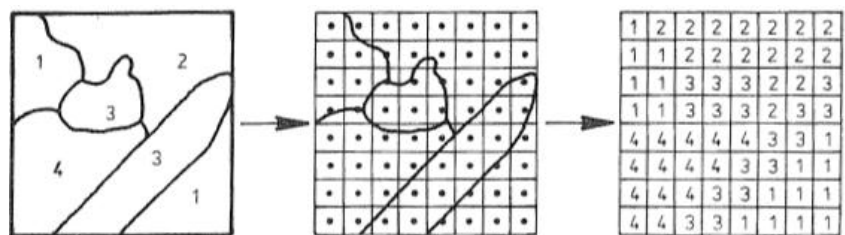


*Obr. 26 TIN*

*(zdroj: vlastní)*

### 4.3.7 Topo to Raster

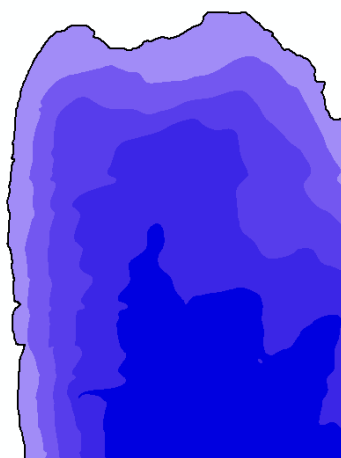
Je metoda, která dokáže vytvořit hydrologicky korektní digitální model terénu (ESRI, 2014). U této metody je umožněno, aby výsledný DMT věrně modeloval náhlé změny terénu, jako například vodní toky. *Topo to Raster* kombinuje vlastnosti více interpolačních metod. Kombinuje výpočetní přesnost lokální metody IDW a prostorovou návaznost globálních metod Spline a Kriging (Oršulák, Pacina, 2010). Funkce *Topo to Raster* provádí proces rasterizace, který je schematicky naznačen na obrázku 27. Při rasterizaci se naměřené hodnoty hloubek „překryjí“ mozaikou pixelů a přiřazená hodnota atributu odpovídá okolí té hloubky, kde se pixel nachází (Kolář, 2003).



**Obr. 27 Rasterizace**

(zdroj: Kolář, 2003)

Pro tvorbu batymetrické mapy by se metoda *Topo to Raster* mohla použít. Nebude však zřejmě vhodná pro všechny typy jezer. Výsledný povrch vytvořený touto metodou je až na pár lokálních extrémů spojitý a vyhlazený.



**Obr. 28 Topo to Raster**

(zdroj: vlastní)

## 5 KARTOGRAFICKÉ METODY UŽÍVANÉ V BATYMETRII

Jak již bylo uvedeno dříve, batymetrie je svými postupy i cíli úzce spjata s hypsometrií. Ve své podstatě ji lze chápat jako podvodní ekvivalent hypsometrie. Z tohoto důvodu jsou batymetrické metody znázorňování hloubek popisovány společně s metodami hypsometrie, z nichž často vychází. V následujícím textu jsou uváděny příklady batymetrických mapování jezer i moří. Metody, které se používají pro mapy moří lze však využít i pro mapování jezer. Z tohoto důvodu jsou v práci obsaženy.

### 5.1 Izolinie

Podle Plánky (2014) jsou izolinie „čáry spojující body o stejných hodnotách dané kvantitativní charakteristiky. Izolinie bývají obvykle konstruovány pomocí interpolace mezi aktuálními hodnotami dané kvantitativní charakteristiky sousedních bodů takovým způsobem, aby oboustranně sousední izolinie vyjadřovaly konstantní rozdíl hodnot sledovaných charakteristik“. Na batymetrických mapách se hloubkové poměry nejčastěji zobrazují izoliniemi, doplněnými barvou (viz. kapitola 5.2). Izolinie v tomto případě spojují místa s konstantní hloubkou a označují se jako izobáty či hloubnice (Krtička, 2007). Na barevných mapách se nejčastěji vykreslují modrou barvou (Čapek, 1992).

Poprvé použil izobáty ke konstrukci batymetrické mapy M. Bolster v roce 1729 na mapě Holandska pro znázornění mořského dna. Prvenství izobát je však častěji přisuzováno Buaché za zákres mořského dna v roce 1737. „Jednou z nejznámějších batymetrických map oceánů je GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), zpracovaná British Oceanographic Data Centre v Liverpoolu v měřítku 1:10 mil (16 mapových listů v Mercatorově zobrazení představuje území do 72° severní šířky), resp. 1:3 100 000 (8 mapových listů zobrazuje polární oblasti v gnómonické projekci) na základě návrhu monackého knížete Alberta z roku 1899. V mezinárodní spolupráci vyšla poprvé v roce 1903“ (Plánka, 2014).

Mnohem podrobněji, než konstrukce izobát, je v kartografické literatuře popisována tvorba izohyps, neboli vrstevnic. Tyto linie spojují místa se stejnou nadmořskou výškou na topografické ploše a ve vhodném intervalu. Nadmořská výška terénu se měří od smluveného referenčního bodu, jehož nadmořská výška je rovna nule.



Za rozšíření používání vrstevnic v Českých zemích se zasloužil Karel Kořistka po roce 1860 (Plánka, 2014).

Z hlediska významu a funkce můžeme vrstevnice na mapách rozlišit na 4 druhy: základní, zdůrazněné, doplňkové a pomocné. Základní mají výšky dělitelné základním intervalem vrstevnic. Zdůrazněné vrstevnice mají výšky dělitelné z pravidla pětinásobkem základního vrstevnicového intervalu a mají zesílenou tloušťku čáry, což usnadňuje čitelnost výškových poměrů na mapě. Doplňkové vrstevnice nemusí být na rozdíl od předcházejících dvou druhů uzavřené. Kreslí se pouze v místech, kde je rozestup základních vrstevnic příliš velký, tudíž nedostatečně vystihuje tvar reliéfu. Kreslí se přerušovanou čarou a jejich interval je roven polovině nebo čtvrtině základního intervalu. Posledním druhem jsou pomocné vrstevnice, které se kreslí plnou čarou v libovolné poloze mezi základními vrstevnicemi tak, aby byly v daném měřítku dostatečně výstižně zobrazeny důležité terénní tvary, které by vhodně nezachytily ani doplňkové vrstevnice (Plánka, 2014). Dále se pomocných vrstevnic využívá v případě, že se průběh terénu výrazně mění, nebo také v oblastech dolů či lomů.

Přestože rozlišování izobát určité hloubky tloušťkou linie není běžné, lze jej rozhodně doporučit. Stejně jako v případě vrstevnic je žádoucí, aby informace obsažené v batymetrické mapě byly čtenáři mapy předány co nejefektivněji. A právě rozlišení izobát dle typu v závislosti na násobku základního intervalu k tomu může napomoci. Pomocné vrstevnice zřejmě využití v batymetrii nenaleznou.

Vrstevnice se kreslí obvykle hnědou barvou, avšak hloubnice bývají standardně znázorněny modrou barvou (Čapek, 1992). Kvalita interpretace výškopisu je silně závislá na vhodné volbě intervalu vrstevnic. Tedy vertikálním rozdílem nadmořských výšek sousedních vrstevnic. V rámci topografických map stejného měřítka bývá interval vrstevnic konstantní (Pavelková, 2013). V českých kartografických dílech je pravidlem, že základní interval vrstevnic je závislý na měřítku mapy podle empirického vztahu  $i=M/5000$ , kde M je měřítkové číslo a každá pátá základní vrstevnice je zesílena (stává se vrstevnicí hlavní). Je pravidlem, že základní interval vrstevnic bývá uveden v legendě.

Výše popsany empirický vztah pro výpočet základního intervalu vrstevnic topografických map není pro batymetrické mapy příliš vhodný. Je to z toho důvodu, že například fluvialní jezera jsou většinou protáhlá, a také bývají poměrně mělká. Při

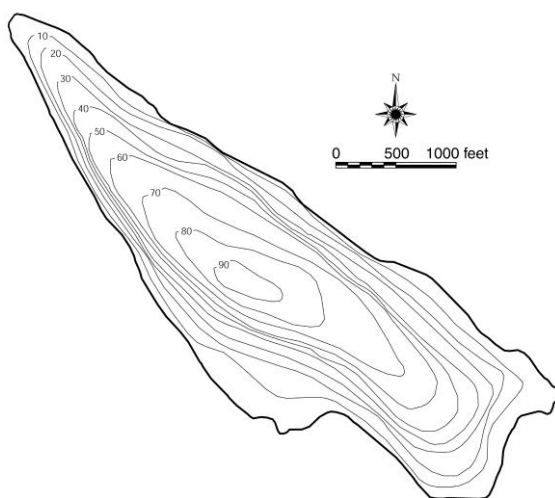
aplikaci tohoto empirického vztahu pro výpočet základního intervalu vrstevnic by na mapě bylo mnoho vrstevnic a mapa by nebyla dobře čitelná.

Pro snadnější čtení výškopisu se vrstevnice doplňují spádovkami. Jsou to krátké úsečky (počátky hřbetnic) a jsou užívány v místech, kde by směr sklonu nemusel být jasný (Plánka, 2014). Spádovky na batymetrických mapách většinou nejsou nutností, jelikož je nejčastěji mapa tvořena kombinací izobát a barevných odstínů, které usnadňují čitelnost hloubkových poměrů a použití spádovek tedy není potřebné.

Popis vrstevnic číselnou hodnotou jejich nadmořské výšky se vždy umísťuje tak, aby byl čitelný při pohledu ve směru stoupání (do svahu). Hlava popisu směřuje nahoru k vrcholu kopce a pata popisu směřuje dolů, tím směrem, kam klesá nadmořská výška. Pro popisování vrstevnic v batymetrii platí stejná pravidla popsaná výše s tím rozdílem, že v batymetrii se zobrazují relativní hloubky a nikoliv absolutní nadmořské výšky.

Kromě klasických vrstevnic se někdy používají také vrstevnice stínované. Mapa se stínovanými vrstevnicemi připomíná stupňovitý model reliéfu osvětlený od severozápadu, tj. z levého horního rohu. Bílou barvou jsou zobrazeny části vrstevnic na osvětlených svazích, naopak na zastíněných jsou černé a šedou barvou jsou zobrazeny mezivrstevnicové plochy, což zlepšuje plastické vnímání reliéfu. U znázorňování mořského dna se však metoda se stínovanými hloubnicemi užívá velmi zřídka (Čapek, 1992).

Obraz dna vodní plochy vytvořený pouze pomocí vrstevnic se uplatňoval spíše dříve (viz. obrázek 29).



**Obr. 29 Batymetrická mapa vytvořená hloubnicemi**

(zdroj:<http://green2.kingcounty.gov/SmallLakes/BathymetricView.aspx?SiteID=48>)

V dnešní době moderních technologií se pro zobrazení hloubkových poměrů používá hlavně kombinace barevné batymetrie a izobát. Mapa je přehlednější a na první pohled jsou patrné hloubkové poměry dané vodní plochy.

## 5.2 Metoda izopleť

Izopleťické mapy se pro svoji názornost používají při znázorňování hloubek velmi často. Podstatou této metody je vyplnění ploch mezi dvěma izoliniemi (Čerba, 2009). V případě batymetrie je tedy izopleť plocha mezi dvěma izobátami vyplněná stejným odstínem barvy.

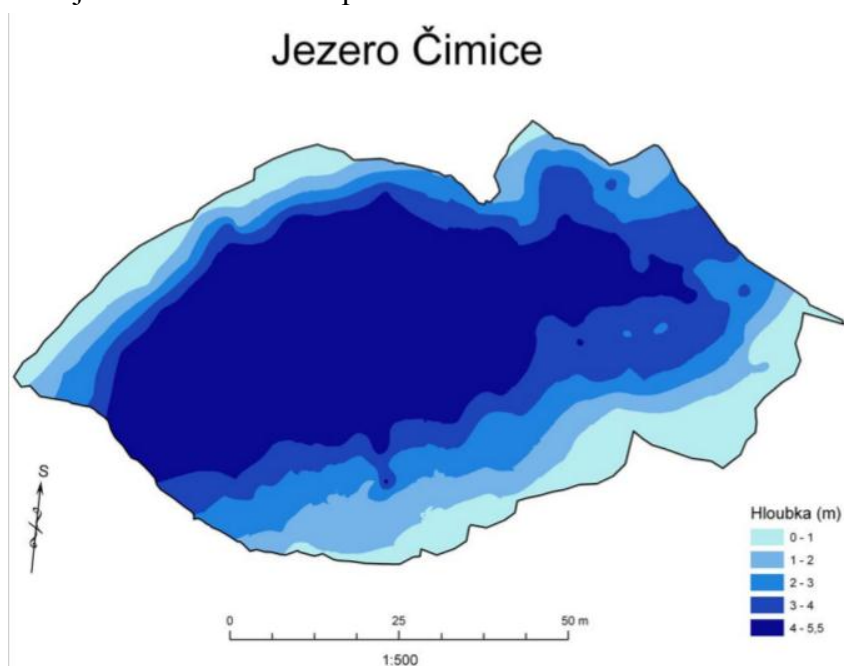
Obdobě jako u izolinií platí, že používání izopleť bylo primárně využíváno při zpracování výškopisu, kde se často označuje jako barevná hypsometrie. Metoda spočívá v barevném, nespojitém znázornění výšek zemského povrchu po jednotlivých výškových stupních. Pojem výškový stupeň je chápán jako výškový rozdíl vrstevnic, které ho ohraničují. Plocha ohraničená těmito vrstevnicemi je výšková vrstva (izopleť), kde má každý výškový stupeň přiřazenou konkrétní barvu na základě hypsometrické stupnice barev (Čapek, 1992).

Dříve používané varianty barevné hypsometrie se dají rozlišit podle určitých zásad. Podle zásady „čím výše, tím temněji“ sestavil Franz von Hauslaub v roce 1830 svoji první stupnici. Jinou variantou barevné hypsometrie byla tzv. Imhofova stupnice vzdušné perspektivy, „kdy se mění barva s rostoucí vzdáleností v důsledku rozptylu a pohlcování světla atmosférou tak, jak ji známe z pozorování z letadla“ (Čapek, 1992). Tato varianta se řídila heslem „čím výše, tím světleji“ - podobně jako je tomu s osvětlením v přírodě. Další varianta stupnice byla navržena Emilem von Sydow a nazývá se stupnice regionálních barev, která se po určitých úpravách používá dodnes. V roce 1898 vytvořil Karl Peucker barevnou stupnici řídící se heslem „čím výše, tím teplejšími barvami“. A je založena na vjemu spektrální řady v důsledku změny vlnové délky. Základem je barevné spektrum bez okrajových barev červené a fialové. Využívá faktu, že červený konec spektra vidí lidské oko blíže. Dnes používanou stupnicí barevné hypsometrie je Sydowova-Wagnerova stupnice, která se od Peuckerovy liší tím, že obsahuje i nespektrální barvy (Plánka, 2014). Všechny výše uvedené varianty barevné

hypsometrie mají společné to, že jejich autoři rezervovali modrou barvu pro vodstvo, tedy pro batymetrii.

V případě batymetrie k žádnému podobnému vývoji barevných stupnic nedošlo. Při pohledu na batymetrické mapy vznikající v Česku a zahraničí lze rozlišit dva různé směry. První vychází z obecných kartografických pravidel pro užívání barev při vyjadřování kvantity. Jak píše Voženílek (1999) – pokud chceme použít barvu pro kvantitativní rozlišení jevů, je základním pravidlem použití barvy dodržení zásady: čím je vyšší intenzita jevu, tím je vyšší intenzita barvy. Nejhlubší místa dané vodní plochy jsou zobrazeny většinou nejtmavší modrou a čím je hloubka menší, tím se volí světlejší odstín modré (pokud není zvolena jiná barevná stupnice – viz. dále), jak můžeme vidět na obrázku 30. Kromě toho se lze setkat s mapami využívajícími barevné stupnice obsahující více barevných tónů. Jako příklad poslouží obrázky 31 a 32. Z kartografického pohledu nelze tento způsob akceptovat, neboť dochází k porušení výše uvedené zásady pro vyjadřování kvantity (hloubka je bezpochyby kvantitativní veličinou).

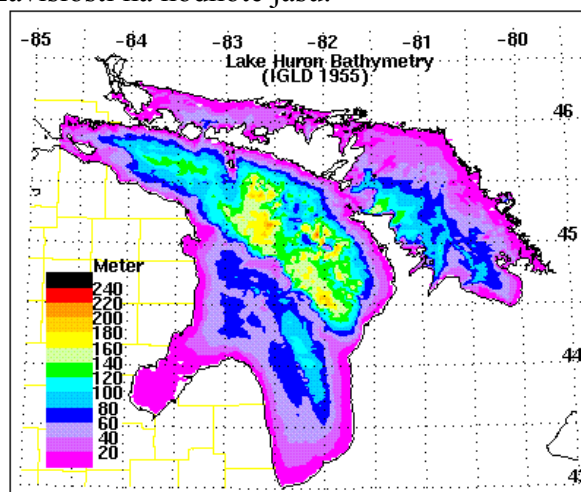
Nejvhodnějším řešením je použití jedné barvy, protože použití více barev může u čtenáře mapy vyvolat pocit nesrozumitelnosti, jelikož může připisovat barvám zcela odlišný význam (většinou kvalitativní). Pokud je nutné použít více barevných tónů, volí se barvy ze stejné části barevného spektra.



**Obr. 30 Batymetrická stupnice - jezero Čimice**

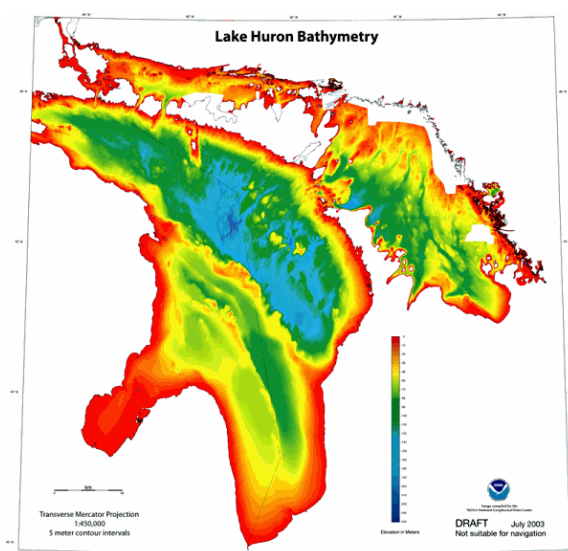
(zdroj: Kuchařová, 2009)

Kromě různých odstínů modré barvy, jak ukazuje obrázek 30 se v batymetrii používají i odstíny jiných barev a jejich kombinace. Výsledné mapy jsou dosti pestrobarevné a dle mého názoru nejsou tak jasně čitelné. Každá mapa má svoji vlastní barevnou stupnici a není na první pohled patrné, jaká barva je použita pro jaký hloubkový stupeň. Viz. například použití žluté barvy na obrázcích 31 a 32. Na prvním obrázku zobrazuje žlutá barva hloubky okolo 180 metrů a na druhém obrázku reprezentuje ta samá barva hloubku okolo 20 metrů. To je pro uživatele mapy matoucí a nemůže na první pohled rozpoznat hloubkové poměry v jezeře, aniž by se před tím nepodíval do legendy, jak jsou barvy jednotlivých hloubkových stupňů seřazeny. Toto je dle mého názoru největší nedostatek oproti různým odstínům jedné barvy, které jsou seřazeny za sebou v závislosti na hodnotě jasu.



**Obr. 31 Batymetrická stupnice - jezero Huron**

(zdroj: [http://www.glerl.noaa.gov/data/bathy/hur\\_bathy.gif](http://www.glerl.noaa.gov/data/bathy/hur_bathy.gif))



**Obr. 32 Jiná batymetrická stupnice - jezero Huron**

(zdroj: <http://lakehuron.ca/uploads/images/Colour.bathymetric.map.of.Lake.Huron.png>)

## 5.3 Kótované body

Kótovaných bodů se v batymetrii hojně využívá, pokud chceme detailněji znát rozložení hloubek v konkrétním místě. Jsou to body, u nichž známe jejich nadmořskou výšku. Přesná hodnota výšky v daném místě nelze kartograficky jinak vyjádřit než pomocí kótovaných bodů. V mapě jsou označeny bodovými symboly, k nimž jsou připsány číselné údaje (kóty). Značka výškového bodu společně s kótou tvoří tak zvaný kótovaný bod.

Kóty lze dělit na absolutní výškové kóty a relativní výškové kóty. Absolutní výškové kóty udávají absolutní nadmořskou výšku a relativní výškové kóty se vztahují k určité srovnávací ploše. U vodních ploch je to průměrná nadmořská výška vodní hladiny.

Pro názorné vystižení výškového uspořádání zemského povrchu se většinou zobrazují výškové kóty v místech hřbetnic, údolnic, úpatnic a dalších důležitých terénních hran. Poměrně často tedy leží na pomyslných orografických čarách. Dále se doplňují kótami v místech vrcholů, sedel, ústí řek, atd.

Batymetrická mapa na obrázku 33 zobrazuje využití kombinace izobát, barevné batymetrie a kótovaných bodů. Při bližším pohledu na mapu může její uživatel přesněji rozpoznat rozložení hloubek, než kdyby byla mapa bez kótovaných bodů. Výškové kóty zde stejně jako u naprosté většiny batymetrickým map, mají relativní hodnotu. To znamená, že zobrazují hloubku jako vzdálenost od vodní hladiny, nikoliv jako absolutní nadmořskou výšku.

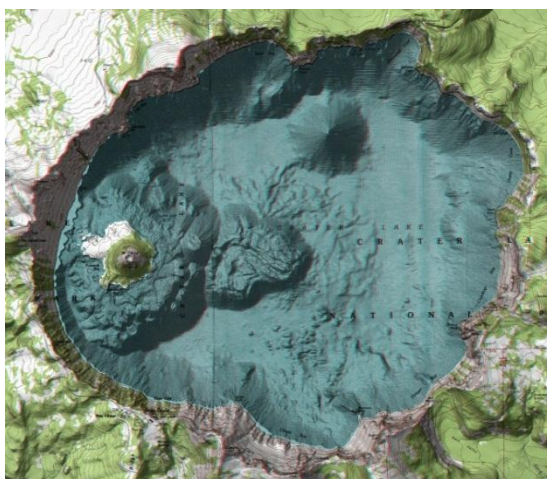


**Obr. 33 Kombinace hloubnic, barevné batymetrie a výškových kót**

(zdroj:[http://www.tcarta.com/home/wp-content/uploads/2011/08/90m\\_bathy\\_GIS.jpg](http://www.tcarta.com/home/wp-content/uploads/2011/08/90m_bathy_GIS.jpg))

## 5.4 Stínování

Tato metoda se v batymetrii používá z důvodu větší plastičnosti a lepší čitelnosti hloubkových poměrů v dané vodní ploše, jak dokazuje obrázek 34, kde je Kráterové jezero (USA) zobrazeno pomocí anaglyfu a metoda stínování je zde jasně patrná.



**Obr. 34 Kráterové jezero (Oregon, USA) - stínování**

(zdroj: <http://oe.oregonexplorer.info/craterlake/images/bathymetry/colormap2.jpg>)

Stínování je ve skutečnosti zvláštním druhem tónování. Rozlišujeme 3 druhy tónování: sklonové tónování, stínování při šikmém osvětlení a kombinované stínování. Sklonové tónování se zakládá na principu „čím strměji, tím temněji“. Vodorovné plochy jsou zobrazeny bílou barvou, šikmé plochy se tónují tím více, čím je větší úhel jejich sklonu. Tento druh tónování nepůsobí příliš plasticky, a proto se samostatně nevyužívá. Stínování při šikmém osvětlení – záleží, z jaké světové strany je model osvětlen (nejčastěji používaný směr osvětlení je od severozápadu). Při této metodě tónování jsou přivrácené svahy světlé, odvrácené svahy tmavé a i vodorovné plochy jsou stínovány. Je to z toho důvodu, že na ně nedopadají sluneční paprsky kolmo. Stínování při šikmém osvětlení působí plasticky a je názorné. Dalším typem je kombinované stínování, které vzniká kombinací předchozích dvou způsobů. Intenzita tónu je ovlivněna a mění se v závislosti na sklonu svahu a směru osvětlení současně. Hlavním směrem osvětlení je podobně jako při metodě stínování při šikmém osvětlení směr od severozápadu. Vedlejší směr osvětlení je od severu (Čapek, 1992).

Velmi důležitými parametry stínování jsou poloha zdroje a směr nasvícení. Pokud by se tyto proměnné zvolily nevhodně, mohlo by dojít k tomu, že reliéf bude

působit sice plasticky, avšak inverzně. Což znamená, že údolí by mohla působit jako hřbety a naopak. V batymetrii lze doporučit polohu zdroje podobně jako na topografických mapách. Tedy nasvícení od severozápadu až severu. Naopak nelze doporučit nasvícení z jihu. Pokud totiž zvolíme polohu zdroje právě na jihu, pak terén působí inverzně.

Jak bylo předesláno na začátku této podkapitoly, v batymetrii se stínování využívá pro lepší a jasnější vystižení tvaru reliéfu dna vodní plochy. Velmi často se s tímto druhem zobrazování reliéfu dna vodní plochy můžeme setkat ve školních atlasech světa či na jiných obecně geografických mapách, kde se barevná batymetrie kombinuje právě se stínováním.

## 5.5 Šrafy

Pro potřeby batymetrie je tato metoda nepoužitelná hlavně z toho důvodu, že by batymetrická mapa nebyla čitelná. A nebyly by z ní patrné hloubkové poměry v dané vodní ploše. Zatímco pro zobrazování výškopisu se tato metoda používala již v 18. století (Kuchař, 1953 in Rohelová, 2014) a poté ještě řadu let, žádnou batymetrickou mapu vytvořenou metodou šrafování se nepodařilo dohledat.

Šrafy jsou krátké čárky, kterými se v mapě zobrazují půdorysné průměty spádnic zemského povrchu. Šrafy jsou kolmé na vrstevnice a jejich hustota je na celé mapě stála, rozdíl je pouze v jejich tloušťce (síle). Šrafy můžeme rozlišovat na stínové nebo pravé. U stínových šraf je strmost svahu vyjádřena délkou šraf a jejich tloušťka je dle osvětlení. Na druhé straně u pravých šraf, kam patří i sklonové šrafy je princip jiný. Šrafy jsou tvořeny dle principu „čím strměji, tím temněji“ a strmost svahu je vyjádřena jak délkou, tak tloušťkou. Reliéf se sklonem nad  $45^\circ$  je zcela černý.

Šrafy jsou v dnešní době již v podstatě mrtvá metoda. Je to hlavně z toho důvodu, že jsou velice náročné na zhotovení, velmi zatěžují mapu, čímž snižují její vyjadřovací schopnost pro ostatní informace jako polohopis a popis. Dalším problémem také je, že tato výškopisná metoda není přesná. Proto se již nepoužívají (Monhart, 2006).



## 5.6 Kopečková metoda

Kopečkovou metodu v batymetrii poprvé použili Bruce Heezen a Marie Tharp, kteří v roce 1957 uveřejnili mapu Atlantské oceánu a přilehlých kontinentů. Použili „pohled z vesmíru“ na oceán, který byl „vysušen“ a výškopis byl zobrazen právě kopečkovou metodou (Strickland, Nuwer, 2009), viz obrázek 35.



**Obr. 35 Atlantský oceán - kopečková metoda**

(zdroj:<http://www.davidrumsey.com/luna/servlet/detail/RUMSEY~8~1~238688~5511615:Physiographic-Diagram,-Atlantic-Oce> vlastní úprava)

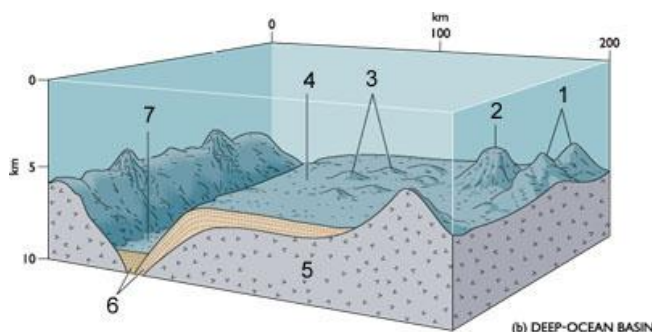
První mapy byly touto metodou vyhotovovány nikoliv na základě měření, ale jen odhadováním a horské hřbety či samostatné vrcholy se znázorňovaly pouze přibližným způsobem kreslením kopečků. Tato metoda však není vůbec vhodná pro znázorňování hloubek či nadmořských výšek, jelikož naznačuje polohu horských pásem a jednotlivých hor velmi schematicky. U kopečkové metody je převládající estetická názornost před geometricky přesnou interpretací, a právě z těchto důvodů je tento způsob znázorňování výškopisu v dnešní době nepoužitelný (Monhart, 2006).

## 5.7 Mapě příbuzná zobrazení

### 5.7.1 Blokdiagram

Další možností znázornění dna vodní plochy je užití mapě příbuzného zobrazení – blokdiagramu. Což je grafické znázornění reliéfu ve 3D diagramu.

Mezi výhody blokdiagramu patří to, že je na první pohled jasně patrný tvar dna včetně případných sníženin či vyvýšenin. Naopak zápornou vlastností blokdiagramu je, že tento typ znázornění nemá ve všech místech stejné zkreslení.



**Obr. 36 Blokdiagram**

(zdroj:[http://science.jpub.com/oceanlink/images/c02f03b\\_lab.jpg](http://science.jpub.com/oceanlink/images/c02f03b_lab.jpg))

### 5.7.2 Pohledová mapa

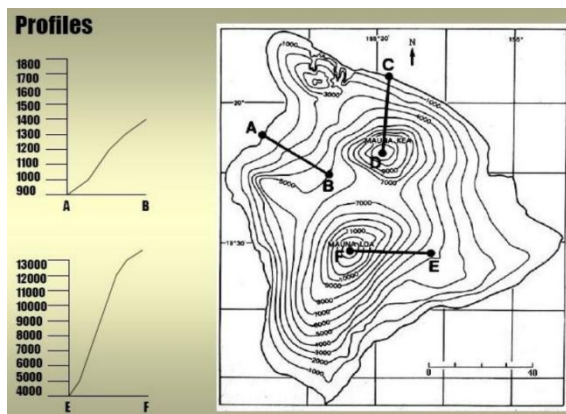
Další mapě příbuzné zobrazení, pomocí kterého lze vizualizovat dno vodní plochy je pohledová mapa. Pohledová mapa se často používá pro zobrazení pohoří. Je to z toho důvodu, že jsou z mapy snadno rozpoznatelné výškové poměry v daném území. Mapa se doplňuje popisy vrcholů, měst a dalších důležitých míst a je zapotřebí zvolit vhodný směr pohledu a vertikální směr pohledu.

Pro účely batymetrie by mohla být mapa využita pro svoji jednoduchost a srozumitelnost i kartografickému laikovi. S doplněním barevné batymetrie do digitálního modelu terénu by byly hloubkové poměry v dané vodní ploše jasně čitelné a rozpoznatelné. Nevýhodou pohledové mapy je, že je zkreslená a tudíž nepodává kartograficky zcela přesné informace.

### 5.7.3 Metoda příčných profilů

Příčný profil je průsečnice svislé roviny s terénem, vedená napříč terénem (VUGTK, 2014). Princip metody příčných profilů je zobrazen na obrázku 37. V zájmovém území se měří výškový rozdíl mezi body A a B a tento rozdíl je vyjádřen křivkou. Tato křivka reprezentuje hloubky na spojnici těchto bodů.

Vzhledem k tomu, že některé moderní přístroje na měření hloubek dokáží kromě bodových souřadnic měřit také profily dna vodních ploch, nachází tato uplatnění právě při tvorbě batymetrických map.



*Obr. 37 Příčný profil*

(zdroj:<http://geomatika.kma.zcu.cz/studium/tka/Slides/izolinie.pdf>)

## 6 DISKUZE S LITERATUROU

V této části budou diskutovány poznatky uvedené v této bakalářské práci a budou porovnány s jinými pracemi. Nejvíce zde bude diskutována práce Jany Kuchařové (2009), jejíž práce Možnosti interpolace jezerních pánví různých genetických typů se nejvíce podobá tématu bakalářské práce mojí. Následující text je uveden ve stejné chronologii jako celá tato bakalářská práce. Nejprve bude diskutována problematika mapování břehové linie, poté měření hloubek, následně interpolace a nakonec budou diskutovány možnosti kombinace kartografických metod užívaných v batymetrii.

### 6.1 Mapování břehové linie

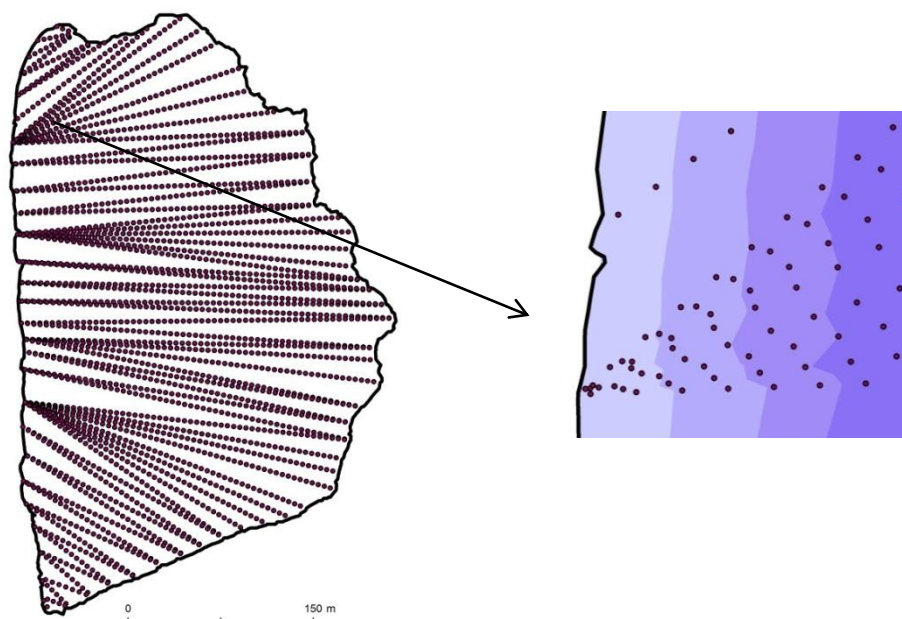
V této práci je popsáno 6 způsobů mapování břehové linie, avšak jak je uvedeno v práci Česáka a Šobra (2005), v Čechách se používají pouze způsoby dva. Autoři ve své práci v kapitole mapování břehové linie uvádějí pouze podkapitoly „mapování ortogonální metodou“ a „mapování pomocí geodetické totální stanice“. Toto rozdělení je ovšem zavádějící, protože ortogonální metoda je metoda a totální stanice je přístroj. Ortogonální metodu můžeme také realizovat totální stanicí. Pro mapování břehové linie českých jezer lze tedy doporučit i nějakou z dalších metod popsanych v kapitole 3.1 této bakalářské práce.

Hugget (2008) získal břehovou linii ruční vektorizací leteckého snímku. Nejprve však ručně vytvořil na břehové linii velké množství bodů, které následně spojoval linií. Tento proces je však velice časově náročný. Zcela jistě by bylo vhodnější do leteckého snímku rovnou nakreslit linii a nevytvářet nejprve body a až následně linii. Nicméně tento způsob je možné využít pouze v případě, že nejsou v okolí jezera žádné stromy, případně další porosty a překážky, které by bránili jasnému rozpoznání půdorysu jezera.

### 6.2 Měření hloubek

Jak udává například Kocum (2004), měření hloubek se provádí v profilech, které spojují zaměřená místa na břehové linii. Mezi jednotlivými zaměřenými body se natáhne kevlarové lanko a hloubky se měří z člunu echolotem podél tohoto lanka po předem definovaných intervalech (standardně po 5 metrech). Nevýhodou této metody je, že více profilů často vychází ze stejného zaměřeného místa na břehu, což vytváří shluky naměřených bodů (viz. obrázek 38). Body takto blízko sebe jsou zbytečné a mohou

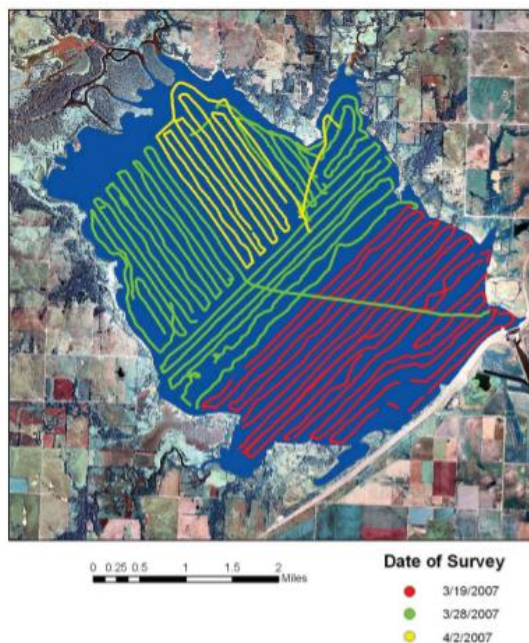
negativně ovlivnit výsledek interpolace - ve výsledné mapě mohou vytvářet náhlé změny reliéfu.



**Obr. 38 Profily**

(zdroj: vlastní)

Vhodnější se zdá metoda, kterou použila například společnost Kansas Biological Survey (2007) při mapování John Redmont Reservoir v USA. Byl použit echolot společně s GPS a mapování probíhalo v pravidelných intervalech po celé ploše jezera, jak je patrné z obrázku 39. Tato metoda je rychlejší a méně pracná než metoda popsaná výše a nedochází při ní až na výjimky k tvorbě již zmiňovaných shluků bodů. Česák a Šobr (2005) uvádějí, že přístroj GPS je „vzhledem k přesnosti měření pozice využitelný pouze na plošně rozlehlých vodních plochách s dobrým příjmem družicového signálu, což u drtivé většiny přírodních i antropogenních jezer v Česku není možné využít“. S tím však nesouhlasí Oršulák, Pacina (2010), kteří uvádějí ve své práci metodu DGPS, která je také popsána v této bakalářské práci v kapitole 3.1.4. Metodou DGPS lze totiž opravit informace GPS měření v terénu a docílit polohové chyby v řádech milimetrů. Proto by se mohla při batymetrických měřeních tato metoda rozhodně uplatnit.



**Obr. 39 Mapování pomocí GPS**

(zdroj: Kansas Biological Survey, 2007)

## 6.3 Interpolace

Kuchařová (2009) ve své práci uvádí, že výsledek interpolace je „zobrazen v rastrové podobě a ta není příliš kvalitní pro mapové zpracování. Pro kvalitnější výsledek je nutné převést rastr na vektor, v tomto případě byl využit formát TIN." S čímž je nutno nesouhlasit, jelikož kvalita rastru závisí na jeho prostorovém rozlišení (velikosti pixelů). Některé obrázkové formáty, jako .jpg, .png, .tiff jsou rastrové a rozhodně se nedá tvrdit, že by nebyly vhodné pro export map. Navíc při uvedeném převodu rastru na vektor dochází ke ztrátě přesnosti. Nabízí se zde otázka, z jakého důvodu nebyl TIN vytvořen rovnou z naměřených dat. Nedocházelo by zde totiž k již zmiňované ztrátě přesnosti.

Všechny interpolační metody popsané v této práci mají společnou nevýhodu v tom, že při základním nastavení nepokrývá výsledný interpolovaný rastr celé zájmové území. V oblastech při březích jezera neproběhne interpolace až do krajů. Toto se dá řešit nastavením *Extent* - definováním hranice výpočtu interpolace. Toto nastavení je buď přímo v dialogovém okně dané funkce, případně ho lze nalézt v nastavení *Environments...*, *Processing Extent*. U metody Natural Neighbor však definování této hranice nefunguje a výsledný rastr má tvar konvexní obálky kolem vstupních bodů. Je tedy nutné zadat jako vstupní soubor pro interpolaci nejen bodové hodnoty hloubek, ale také body tvořící břehovou linii s hloubkou 0. Díky tomuto nastavení pokrývá výsledný rastr celé zájmové území. Kuchařová (2009) zřejmě aplikovala metodu Natural Neighbor pouze na bodové hodnoty hloubek, jelikož uvádí, že „metoda Natural

Neighbor dokázala spočítat pouze oblasti s naměřenými hodnotami, nedokázala dopočítat hodnoty až ke krajům“. Dále uvádí, že oblast, kde proběhla interpolace se „nezvětšila ani po změně hodnoty u Output Cell Size“. Nelze očekávat, že změna velikosti pixelu zapříčiní to, že se zvětší zájmová oblast. Kuchařová (2009) také uvádí, že metoda Natural Neighbor „nedokázala dopočítat hodnoty za hranici zadaných bodů“. V obecném popise metody Natural Neighbor v této práci v kapitole 4.2.1.3 je však uvedeno, že tato metoda dané hodnoty dopočítá, ale jelikož je založena na Thiessenových polygonech a ty by v krajních hodnotách tvořily nekonečnou plochu, tak je výsledkem této metody již zmiňovaná konvexní obálka kolem krajních bodů.

Autorka také zmiňuje Trend jako jednu z dalších interpolačních metod což je v rozporu s například Jingpei et. al. (2013), kde autoři popisují Trend jako metodu aproximační a nikoliv interpolační.

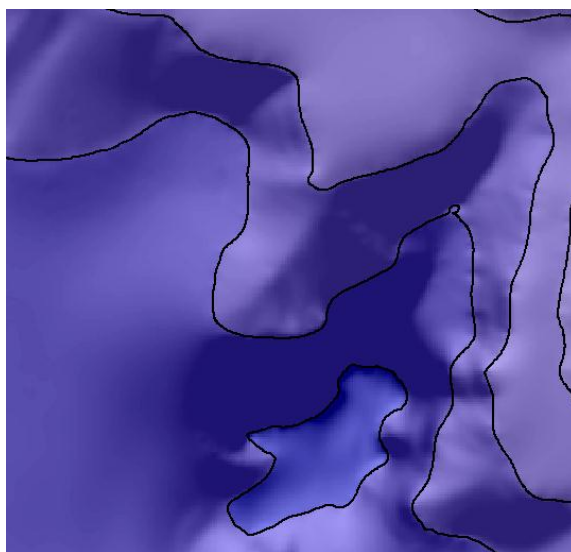
Dále Kuchařová (2009) nikde nevysvětluje bull eyes tolik charakteristické pro IDW. Zmiňuje pouze „velmi malé ostrůvky osamocených hloubek“, ale již nerozlišuje, že se jedná o bull eyes. Tento problém zcela opomíjí. U IDW dále uvádí, že „Čím vyšší číslo v kolonce Power se zadá, tím jsou přechody méně ostré a celkový výsledek začíná být nereálný.“ Toto tvrzení však není nijak odůvodněno ani podloženo. Dále není zcela zřejmé, co chtěla autorka vyjádřit tvrzením, že „výsledek interpolace byl rastrového vzhledu i přesto, že se jednalo o vektorový formát“. Výstupy interpolační metody IDW jsou však vždy produkovány v podobě rastru.

Kuchařová (2009) se nikterak nezabývá validací výsledků, naopak Horák (2008) uvádí podobně jako tato bakalářská práce metody Cross-Validation a validaci kontrolním vzorkem. Stejně možnosti popisuje ve své práci věnované batymetrii také Poti et. al. (2012). Pro validaci kontrolním vzorkem je ovšem nutné mít k dispozici část dat nepoužitých při výpočtu odhadu. Jak uvádí Křikavová (2009) často je množství naměřených dat příliš malé na to, aby mohla být část dat vynechána. Pokud ovšem máme k dispozici velké množství naměřených dat, pak lze doporučit použití obou metod pro lepší posouzení kvality proběhlé interpolace.



## 6.4 Kombinace metod znázorňování hloubek

Metody znázorňování hloubek popsané v kapitole 5 lze při tvorbě batymetrických map použít samostatně, ale je také možné tyto metody kombinovat tak, aby výsledná mapa byla lépe čitelná a podávala informace o hloubkách srozumitelněji. Je jasné, že ne všechny metody popsané v kapitole 5 je možné při těchto kombinacích uplatnit. Nelze například doporučit použití kopečkové metody vzhledem k tomu, že nepodává geometricky přesné informace (viz. kapitola 5.6). Podobně nelze uplatnit ani metodu šrafování (kapitola 5.5), jelikož by byla výsledná mapa příliš „zatížená“ šrafami a v kombinaci s jinými metodami by nebyla čitelná. Z metod popsaných v kapitole 5 zbývají tedy vrstevnice, barevná batymetrie, kótované body a stínování. Nelze však uplatnit všechny kombinace těchto metod. Na obrázku 40 je vizualizováno Čertovo jezero pomocí hloubnic, stínování a barevné batymetrie. Přestože například společnost The Mapping Network (2010) má na svých webových stránkách uvedenou batymetrickou mapu vytvořenou kombinací barevné batymetrie a stínování, je použití této kombinace zcela nevhodné vzhledem k tomu, že jednotlivé hloubkové stupně nejsou zobrazeny stejným odstínem barvy. Je to z toho důvodu, že stínování osvětluje každou část svahu jinak – vytváří dojem přivrácených a odvrácených svahů a i když se jedná o stejný hloubkový stupeň, tak se odstíny modré barvy výrazně liší, tudíž by nebylo možné vytvořit odpovídající legendu. V některých případech dochází také k propadání barev. Z těchto důvodů nelze kombinaci těchto metod doporučit.

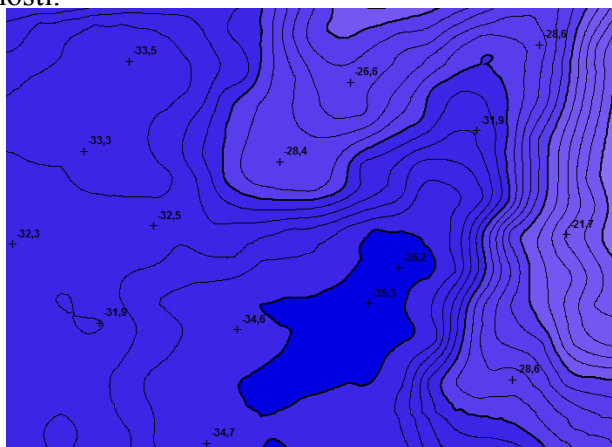


*Obr. 40 Hloubnice, stínování, barevná batymetrie*

*(zdroj: vlastní)*



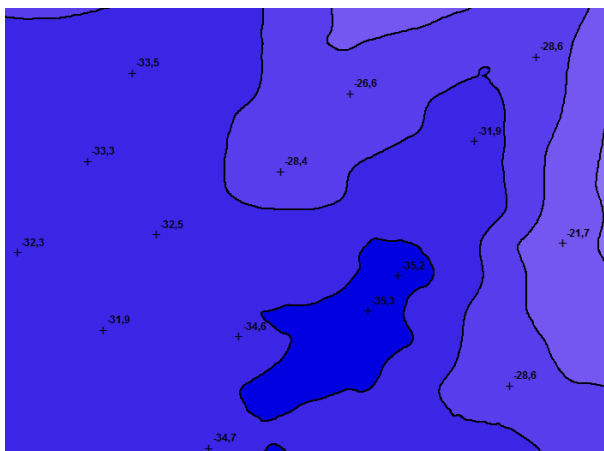
Běžně se lze setkat s kombinací metod izolinií a barevné batymetrie, což používají například Pošta (2004), Hrdinka (2004), Bervicová (2006), případně Šobr (2007) a mnoho dalších. Lze však doporučit například kombinaci barevné batymetrie, vrstevnic a kótovaných bodů. Výřez takovéto mapy je zobrazen na obrázku 41. Mapa je na první pohled srozumitelná, velmi dobře čitelná a jsou jasné patrné hloubkové poměry v dané vodní ploše. Lze doporučit použití zdůrazněných vrstevnic, které jsou v tomto případě pětinasobkem základního intervalu vrstevnic. Zdůrazněné vrstevnice oddělují jednotlivé izoplety, které jsou rozlišeny různými odstíny modré barvy, což mapě přidává na přehlednosti.



**Obr. 41 Hloubnice, barevná batymetrie, kótované body**

(zdroj: vlastní)

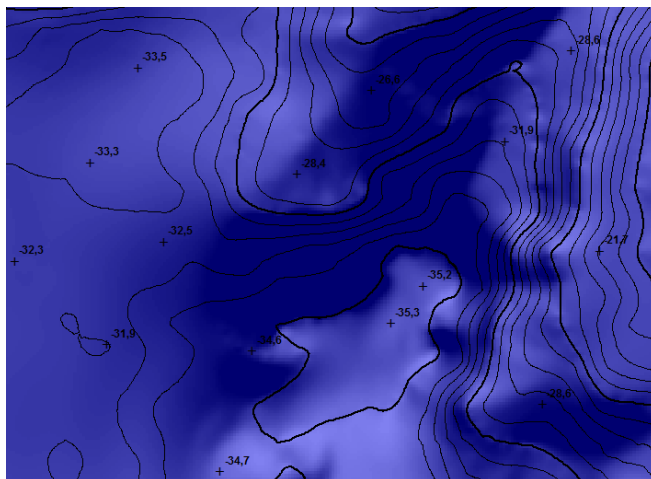
Lze také vytvořit batymetrickou mapu s použitím vrstevnic pouze pro oddělení jednotlivých izoplet, což uvádí například Bervicová (2006), případně Šobr (2007), ale rozložení hloubek v dané vodní ploše není v některých místech na první pohled tak jasné patrné jako při použití menšího základního intervalu vrstevnic, jak je popsáno v předchozím odstavci. Obě varianty lze porovnat na obrázcích 41 a 42.



**Obr. 42 Izolinie oddělující pouze izoplety**

(zdroj: vlastní)

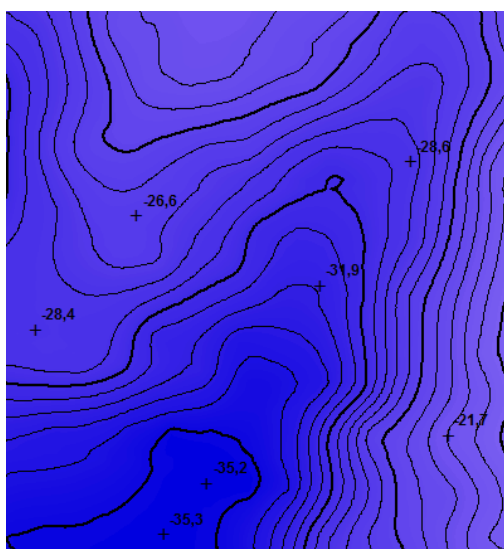
Další vhodnou kombinací, která může nalézt uplatnění při tvorbě batymetrických map je kombinace vrstevnic, kótovaných bodů a stínování. Tato kombinace je zobrazena na obrázku 43. Mapa je přehledná a díky stínování působí plasticky a uživatel mapy si dokáže snadno představit členitost dna dané vodní plochy.



**Obr. 43 Hloubnice, stínování, kótované body**

(zdroj: vlastní)

Například Hrdinka (2004) používá také kombinaci metody izolinií společně s gradientem. U této metody nejsou jako u metody izoplet rozděleny hloubkové stupně po jednotlivých intervalech, ale odstíny postupně přechází od nejsvětější po nejtmavší modrou. Při použití gradientu je mapa velice názorná, ale na rozdíl od metody izoplet nejsou v mapě jasně definovány hloubkové stupně a při nevhodně zvoleném intervalu vrstevnic není na první pohled tak jasně patrné, jaká hloubka se v daném místě nachází. Na obrázku 44 je zobrazeno použití metody gradientu společně s kótovanými body a vrstevnicemi.



**Obr. 44 Hloubnice, gradient, kótované body**

(zdroj: vlastní)

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo popsat a zhodnotit současné postupy při tvorbě batymetrických map jezer.

V první části jsou popsány různé možnosti sběru batymetrických dat. Práce se zaměřuje nejen na měření hloubek, ale také na mapování břehové linie. Zde uvedené metody jsou detailně popsány a v každé kapitole je vždy také zdůvodněna použitelnost dané metody pro potřeby batymetrie.

Na tuto kapitolu navazuje část věnovaná obecnému popisu interpolačních metod, které je možné aplikovat na naměřené bodové hodnoty hloubek. U každé metody jsou uvedeny jejich charakteristické vlastnosti, vzorce a konkrétní příklady použití. Následně je prostor věnovaný popisu fungování těchto metod v prostředí ArcGIS, kde je na konkrétních příkladech ukázána použitelnost jednotlivých metod pro účely tvorby batymetrických map, což je doplněno grafickými ukázkami pro lepší názornost.

V další části jsou popisovány kartografické metody užívané v batymetrii a je zde zdůvodněna jejich použitelnost. Na konci je také prostor věnovaný diskuzi a zhodnocení současných batymetrických map. V této práci byl také navrhnut vlastní postup, jak kombinací metod znázorňování hloubek vytvořit konečnou mapu tak, aby byly batymetrické mapy názornější a podávaly detailnější informace o morfologii dna dané vodní plochy. Takto vytvořené mapy jsou součástí příloh a je možné je porovnat s mapou vytvořenou na Katedře fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze pro připravovaný Atlas jezer ČR. Tato mapa je také součástí příloh.

Snahou této práce bylo také zjistit, zda lze obecně prohlásit, že určitá interpolační metoda je nejlepší pro tvorbu batymetrických map. V průběhu tvorby této práce však bylo zjištěno, že žádné takovéto obecné doporučení nelze vydat. Volba vhodné interpolační metody může být ovlivněna řadou faktorů. Zejména je třeba brát v úvahu hustotu a rozmístění vstupních bodů. Je důležité rozlišit, zda byly hloubky měřeny v profilech, případně, zda byly pravidelně rozmístěny a bylo použito GPS, nebo byl využit LIDAR a máme k dispozici velmi hustou síť vstupních bodů po celé ploše jezera, nebo byla využita nějaká jiná metoda. Každá interpolační metoda se s takto charakteristickými vlastnostmi vypořádá jinak a z těchto důvodů může být výsledek

interpolace vždy odlišný a nelze obecně označit určitou interpolační metodu jako nejvhodnější. Lze však doporučit metody Cross-Validation a validace, které dokáží výběr vhodné interpolační metody usnadnit a dosáhnout tak co nejlepšího výsledku.

Přestože tato práce nedokázala obecně doporučit určitou interpolační metodu vhodnou pro účely batymetrie, podává ucelené informace o problematice batymetrie z hlediska kartografického a geoinformatického a mohla by sloužit jako cenný zdroj informací pro hydrology a další výzkumníky zabývající se problémem batymetrie.

## SEZNAM ZDROJŮ INFORMACÍ

- BADEA, D.; JACOBSEN, K. 2008. *Filtering process of lidar data*. In: International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing [online]. Beijing : 2008 [cit. 2014-07-17]. Volume 37, Part B1, p. 815 – 819. Dostupné z URL: <[http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1\\_pdf/141.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/141.pdf)>. ISSN 1682-1750.
- BALTSAVIAS, E. P. 1999. *A comparison between photogrammetry and laser scanning*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing [online]. Volume 54, Issue 2/3, p. 83 – 94. [cit. 2014-07-17]. Dostupné z URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.42.6581&rep=rep1&type=pdf>>. ISSN 0924-2716.
- BAYER, T. 2008. *Algoritmy v digitální kartografii*. 1. vyd. Praha: Karolinum. 2008. 251 s.
- BERVICOVÁ, D. 2006. *Limnologická charakteristika vybraných antropogenních jezer ČR*. Praha, 2006. 85 s. Vedoucí práce Miroslav Šobr.
- BOHLING, G. 2005. *Kriging*. Kansas Geological Survey. 2005, 20 s. Dostupné z URL: <<http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/Kriging.pdf>>.
- ČAPEK, R. 1992. *Geografická kartografie*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství. 373 s.
- ČERBA, O. 2009. *Úvod do kartografie*. [online] Slidy z přednášek TKa. Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2011. [cit. 2014-08-07] Dostupné z URL: <[http://www.gis.zcu.cz/studium/tka/Slides/uvod\\_do\\_kartografie.pdf](http://www.gis.zcu.cz/studium/tka/Slides/uvod_do_kartografie.pdf)>.
- ČESÁK, J.; ŠOBR, M. 2005. *Metody batymetrického mapování českých jezer*. Sborník ČGS. 2005, č. 110, s. 141-151.
- DAVIS, B. M. 1987. *Uses and abuses of Cross-validation in geostatistics*. [online]. Mathematical Geology, 19(3), 1987 [cit. 2014-07-11]. p 241-248. Dostupné z URL: <<http://link.springer.com/article/10.1007/BF00897749>>.
- DOLANSKÝ, T. 2004. *Lidary a letecké laserové skenování* [online]. Ústí nad Labem : Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. [cit. 2014-06-20]. 100 s. Dostupné z URL: <<http://wvc.pf.jcu.cz/ki/data/files/160lidaryweb.pdf>>. ISBN 80-7044-575-0.

- ESRI 2014: *ArcGIS Resource center* [online]. 2014 [cit. 2014-07-30]. Dostupné z: <<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2>>.
- GWINN, et. al. 1987. *Encyclopædia Britannica*. The New Encyclopædia Britannica, MICROPAEDIA and MACROPAEDIA, Chicago.
- HAUF, M. 1982. *Geodézie*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982, 544 s.
- HELLEBRAND, R. 2011. *Interpolace dešťoměrných dat metodou IDW*. [online]. 2011 [cit. 2014-06-15]. Dostupné z URL: <[http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/3/Hellebrand\\_Radek\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/3/Hellebrand_Radek_CL.pdf)>.
- HORÁK, J. 2008. *Prostorové analýzy v podruží software*. [online]. Sborník konference s mezinárodní účastí 15 Rokov vojenskej geografie na Slovensku. 2008, [cit. 2014-08-12]. ISSN 978-80-89261-21-5, 1-14. Dostupné z URL: <[http://www.topu.mil.sk/data/att/15663\\_subor.pdf](http://www.topu.mil.sk/data/att/15663_subor.pdf)>
- HRDINKA, T. 2004. *Antropogenní jezera České republiky*. Praha, 2004. 115 s. Vedoucí práce Bohumír Janský.
- HUGGETT, B. 2008. *Fletcher Lake Bathymetry*. 2008, 47 s.
- CHILDS, C. 2004. *Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst* [online]. ESRI. 2004, [cit. 2014-07-17]. p. 32-35. Dostupné z URL: <<http://webapps.fundp.ac.be/geotp/SIG/interpolating.pdf>>.
- CHILÈS, J. P., DELFINER. P. 2012. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Second edition. Wiley, 2012, 734 p. ISBN 0470183152.
- ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, R.M. 1989. *Applied Geostatistics*. First edition. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.
- JAROŠ, J. 2011. *Detekce linií terénní kostry z dat leteckého laserového skenování*. Praha, Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze. 2011. 86 s. Vedoucí práce Jakub Lysák.
- JINGPEI, D. et al. 2013. *Piecewise Trend Approximation: A Ratio-Based Time Series Representation*. [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2013, [cit. 2014-08-10]. 7 p. Dostupné z URL: <<http://dx.doi.org/10.1155/2013/603629>>.
- JEŽEK, J. 2008. *Geostatistika – úvod do geostatistiky*. 1. vyd. Praha: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze. 2008. 63 s.
- KANSAS BIOLOGICAL SURVEY. 2007. *Bathymetric Survey of John*

- Redmond Reservoir, Coffey County, Kansas* [online]. 2007. [cit. 2014-08-05]. 29 p. Dostupné z URL: <[http://www.kwo.org/reservoirs/ReservoirBathymetry/JohnRedmondReservoir\\_revised\\_12010\\_kbs.pdf](http://www.kwo.org/reservoirs/ReservoirBathymetry/JohnRedmondReservoir_revised_12010_kbs.pdf)>.
- KOCUM, J. 2004. *Limnologická studie Čertova jezera a režim odtoků v českém povodí Řezné*. Praha, 2004. Vedoucí práce Bohumír Janský.
  - KOLÁŘ, J. 2003. *Geografické informační systémy 10*. 2. přeprac. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT. 2003. 161 s.
  - KONGSBERG MARITIME. 2014. [online]. 2014 [cit. 2014-06-05]. Dostupné z URL: <<http://www.km.kongsberg.com/>>.
  - KRAUS, J. 2007. *Geostatistika jako prostorové modelování statistických jevů*. [online]. Český statistický úřad. Praha. 2007. [cit. 2014-05-24]. 13 s. Dostupné z URL: <<http://panda.hyperlink.cz/cestapdf/pdf07c6/kraus.pdf>>.
  - KRAUS, K.; PFEIFER, N. 1998. *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing [online]. Volume 53, Issue 2/3, p. 193 – 203. [cit. 2014-07-17]. Dostupné z URL: <<http://www.martinkodde.nl/glacier/data/bibliography/2526743040kraus.pdf>>. ISSN 0924-2716.
  - KRTIČKA, L. 2007. *Úvod do kartografie I*. [online]. 1. vyd. Ostrava: Ostravská univerzita, 2007. [cit. 2014-06-06] 87 s. Dostupné z URL: <[http://www1.osu.cz/~krticka/Krticka\\_DiV\\_Kartografie.pdf](http://www1.osu.cz/~krticka/Krticka_DiV_Kartografie.pdf)>.
  - KŘIKAVOVÁ, L. 2009. *Interpolace bodových dat v GIS*. [online]. Praha, Bakalářská práce na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Praze. 2009. [cit. 2014-06-06]. 55 s. Vedoucí práce Jiří Cajthaml. Dostupné z URL: <[http://maps.fsv.cvut.cz/diplomky/2009\\_BP\\_Krikavova\\_Interpolace\\_bodovych\\_dat\\_v\\_GIS.pdf](http://maps.fsv.cvut.cz/diplomky/2009_BP_Krikavova_Interpolace_bodovych_dat_v_GIS.pdf)>.
  - KUCHAR, K. 1947. *Mapy šumavských jezer podle měření prof. V. Švambery*. Kartografický přehled. Praha, 1947, s. 40–42.
  - KUCHAR, K. 1953. *Základy kartografie*. Praha: Nakl. ČSAV, 1953. 190 s.
  - KUCHAROVÁ, J. 2009. *Možnosti interpolace jezerních pánví různých genetických typů*. Praha, Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze. 2009. 35 s. Vedoucí práce Miroslav Šobr.

- LASSITER, A. 2014. *Kriging overview: Part 1: Variograms*. [online]. 2014 [cit. 2014-07-02]. Dostupné z URL: <<http://allisonlassiter.com/2014/05/13/kriging-overview-part-1-variograms>>.
- LI, J., HEAP, A.D. 2008. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. Geoscience Australia. 2008. 154p. ISBN 978 1 921498 29 9.
- LETKO, I. 2013. *Predikce hodnot těhových veličin na základě terestrických měření a digitálního modelu terénu*. [online]. Brno, Diplomová práce na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně. 2013. [cit. 2014-07-20]. 48 s. Vedoucí práce Radovan Machotka. Dostupné z URL: <<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/29446/11932.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
- MERRIAM-WEBSTER ONLINE DICTIONARY [online], 2014 in Merriam-Webster, Incorporated [cit. 2014-05-25]. Dostupné z URL: <<http://www.m-w.com/cgi-bin/dictionary?book=Dictionary&va=bathymetry>>.
- MILLER, H. J. *Tobler's First Law and Spatial Analysis* [online]. University of Utah. 2004 [cit. 2014-06-24] p. 284-289. Dostupné z URL: <[http://dds.cepal.org/infancia/guide-to-estimating-child-poverty/bibliografia/capitulo-IV/Miller%20Harvey%20J%20\(2004\)%20Tobler%20s%20first%20law%20and%20spatial%20analysis.pdf](http://dds.cepal.org/infancia/guide-to-estimating-child-poverty/bibliografia/capitulo-IV/Miller%20Harvey%20J%20(2004)%20Tobler%20s%20first%20law%20and%20spatial%20analysis.pdf)>.
- MCGWIRE, K. C. 1996. *Cross-Validated Assessment of Geometric Accuracy* [online]. Biological Sciences Center, Reno, 1996, [cit. 2014-07-17]. p. 1179-1187. Dostupné u URL: <[http://www.asprs.org/a/publications/pers/96journal/october/1996\\_oct\\_1179-1187.pdf](http://www.asprs.org/a/publications/pers/96journal/october/1996_oct_1179-1187.pdf)>.
- MONHART, V. 2006. *Metody znázorňování výškopisu na mapách*. [online]. Plzeň, Bakalářská práce na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. 2006. [cit. 2014-06-13]. 60 s. Vedoucí práce Karel Jedlička. Dostupné u URL: <[http://www.kma.zcu.cz/DATA/zaverecne\\_prace/Monhart\\_\\_Metody\\_znazornovani\\_vyskopisu\\_na\\_mapach\\_\\_BP.pdf](http://www.kma.zcu.cz/DATA/zaverecne_prace/Monhart__Metody_znazornovani_vyskopisu_na_mapach__BP.pdf)>.



- ORŠULÁK, T.; PACINA, J. 2010. *3D modelování a virtuální realita* [online]. 1. vyd. Ústí nad Labem : Centrum pro virtuální realitu a modelování krajiny, 2010 [cit. 2014-06-25]. 63 s. Dostupné z URL: <<http://gis.fzp.ujep.cz/DTM/3d.pdf>>.
- PAVELKOVÁ, Z. 2013. *Interpretace výškopisu na topografických mapách USA* [online]. Brno, Diplomová práce na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně, 2013. [cit. 2014-06-20]. 68 s. Vedoucí práce Ladislav Plánka. Dostupné u URL: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=76574](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=76574)>.
- PLÁNKA, L. 2014. *Kartografie I.* [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – technická universita, 2014. [cit. 2014-06-20]. 243 s. Dostupné z URL: <[http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Kartografie\\_I.pdf](http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Kartografie_I.pdf)>.
- POKORA, M. 1985. *Geodézie*. 1. vyd. Praha: Geodetický a kartografický podnik, 1985, 548 s.
- POKORNÁ, M. 2004. *EM 2000 Microbathymetric and HYDROSWEEP DS-2 Bathymetric Surveying – a Comparison of Seafloor Topography at Porcupine Bank, west of Ireland* [online]. Praha, Diplomová práce na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického, 2004. [cit. 2014-05-21] 232 s. Vedoucí práce Jan Kostelecký. Dostupné z URL: <<http://epic.awi.de/30413/1/Pokorn%C3%A1%202004%20-%20Diploma%20Thesis.pdf>>.
- POKORNÁ, M. 2006. *Za hranice batymetrie*. [online] 2006, [cit. 2014-05-27] 10 s. Dostupné z URL: <[http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/pdf/Sekce\\_6.2/Pokorna\\_Marketa\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/pdf/Sekce_6.2/Pokorna_Marketa_CL.pdf)>.
- POŠTA, P. 2004. *Organogenní jezera v České republice*. Praha, 2004. 116 s. Vedoucí práce Bohumír Janský.
- POTI, M. et. al. 2012. *Bathymetry*. [online]. Center for Coastal Monitoring and Assessment, 2012, [cit. 2014-08-09]. p. 9-32. Dostupné z URL: <[http://ccma.nos.noaa.gov/ecosystems/coastalocean/ny\\_report/nycmsp\\_ch2\\_bathymetry.pdf](http://ccma.nos.noaa.gov/ecosystems/coastalocean/ny_report/nycmsp_ch2_bathymetry.pdf)>
- PRESS, W. H. et al. 1988. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Third edition. Cambridge University Press, 1988, 1262 p. ISBN 0-511-33555-5.

- RATIBORSKÝ, J. 1995. *Geodézie: polohopis*. České vysoké učení technické v Praze, 1995, 136 s. ISBN 9788001012697.
- RIPLEY, B. D. 1981. *Spatial Statistics*. First edition. New York: John Wiley & Sons, 1981. 252 p.
- ROHELOVÁ, K. 2014. *Šrafy v digitální kartografii*. Praha, Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze. 2014. 66 s. Vedoucí práce Jakub Lysák.
- SALOUS, S. 2013. *Radio propagation measurement and channel modelling*. Chichester, England: Wiley 2013, 422s. ISBN: 978-0-470-75184-8.
- SONG, J., DEPINTO J. V. 1995. *A GIS-based Data Query System*. Presented at the International Association for Great Lakes Research (IAGLR) Conference, Windsor, Ontario.
- STEIN, M. L. 1999. *Interpolation of Spatial Data: Some theory for Kriging*. University of Chicago. Springer, 1999, 243 p. ISBN 0-387-98629-4.
- STRICKLAND a NUWER. 2009. *Oceanography 102*. [online] Slidy z přednášek Oceanography. University of Washington, Washington 2009. [cit.2014-06-07] Dostupné z URL: <[http://courses.washington.edu/ocean102/Lex/Lex\\_09/Lecture6.pdf](http://courses.washington.edu/ocean102/Lex/Lex_09/Lecture6.pdf)>.
- ŠOBR, M.; JANSKÝ, B. 2003. *Jezera České republiky*. Praha: Univerzita Karlova. 2003, 199 s.
- ŠOBR, M. 2007. *Jezera České republiky: fyzickogeografické a fyzikálně-limnologické poměry*. Praha, 2007. 235 s. Vedoucí práce Bohumír Janský.
- ŠTYCH, P. 2008. *Vybrané funkce geoinformačních systémů*. Praha: Česká kosmická kancelář. 2008. 177 s.
- ŠVAMBERA, V. 1912. *Výzkum šumavských jezer: Die Erforschung der Böhmerwaldseen*. Praha: Geografický ústav. 1912, 90 s.
- THE MAPPING NETWORK. 2010. [online]. 2010 [cit. 2014-08-10]. Dostupné z URL: <<http://themappingnetwork.files.wordpress.com/2010/12/anr-blog-map.jpg>>.
- THEUER, M. 2012. *Metody křížového ověřování pro jádrové odhady hustoty*. [online]. Brno, Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity. 2012. [cit. 2014-08-06]. 52 s. Vedoucí práce Ivanka Horová. Dostupné u URL: <[http://is.muni.cz/th/211151/prif\\_m/Diplomova\\_prace.pdf](http://is.muni.cz/th/211151/prif_m/Diplomova_prace.pdf)>.

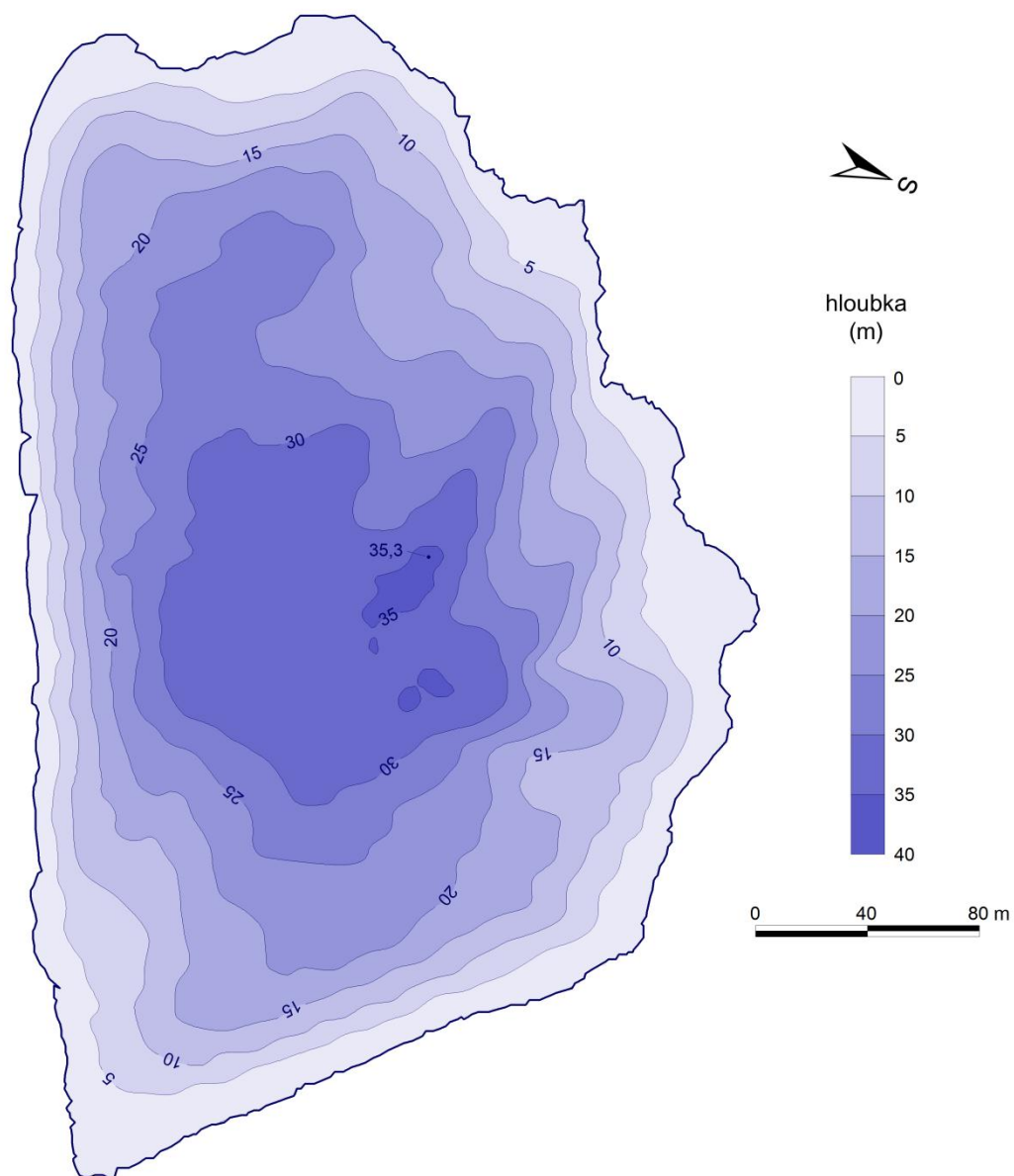
- TOBLER, W. R. 1970. *A computer movie simulating urban growth in the Detroit region*. Economic Geography 46: 1970. p. 234–40.
- TOMCZAK, M. 1998. *Spatial Interpolation and its Uncertainty Using Automated Anisotropic Inverse Distance Weighting (IDW) - Cross-Validation/Jackknife Approach*. [online]. Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 1998. [cit. 2014-07-03]. p. 18-30. Dostupné z URL: <<http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/disciplinas:geosalq:edercomunello-artigo2.pdf>>.
- VICHROVÁ, M. 2011. *Metody mapování polohopisu dříve a nyní*. [online] Slidy z přednášek KMA. Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2011. [cit.2014-08-06] Dostupné z URL: <[http://www.gis.zcu.cz/projekty/Geomatika\\_multimedialne/TOMA/Metody%20mapovani%20polohopisu%20drive%20a%20nyni\\_T.pdf](http://www.gis.zcu.cz/projekty/Geomatika_multimedialne/TOMA/Metody%20mapovani%20polohopisu%20drive%20a%20nyni_T.pdf)>.
- VOŽENÍLEK, V. 1999. *Aplikovaná kartografie I: tematické mapy*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého. 168 s.
- VÚGTK. 2005-2014. *Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí* [online]. VÚGTK 2005-2014. [cit. 2014-07-11]. Dostupné z URL: <<http://www.vugtk.cz/slovník>>.
- WEBSTER, R., OLIVER, M. 2001. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England. 2001. 271p.
- WOLBERG, G. 1988. *Cubic spline interpolation: A review*. Columbia University. 1988. 14s. Dostupné z URL: <[http://academiccommons.columbia.edu/download/fedora\\_content/download/ac:142812/CONTENT/cucs-389-88.pdf](http://academiccommons.columbia.edu/download/fedora_content/download/ac:142812/CONTENT/cucs-389-88.pdf)>.

# SEZNAM PŘÍLOH

- |           |  |
|-----------|--|
| Příloha 1 | CD s elektronickou verzí práce   |
| Příloha 2 | Mapa Čertova jezera vytvořená na Katedře fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze pro připravovaný Atlas jezer ČR |
| Příloha 3 | Mapa Čertova jezera – kombinace hloubnic, barevné batymetrie a kótovaných bodů   |
| Příloha 4 | Mapa Čertova jezera – kombinace hloubnic, stínování a kótovaných bodů  |

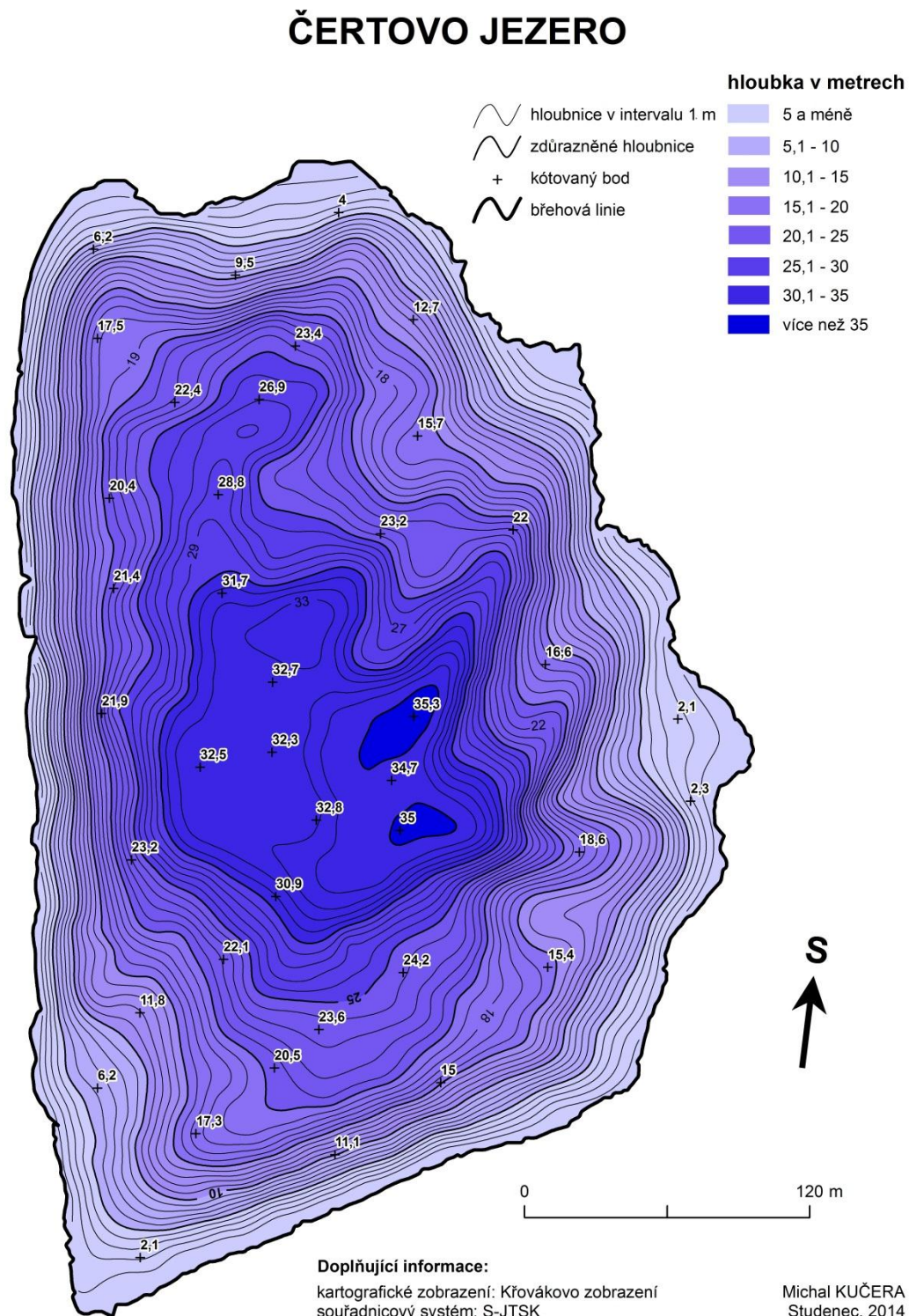
## Příloha 2

### Mapa Čertova jezera pro připravovaný Atlas jezer ČR



### Příloha 3

## Čertovo jezero – kombinace hloubnic, barevné batymetrie a kótovaných bodů





## Příloha 4

### Čertovo jezero – kombinace hloubnic, stínování a kótovaných bodů

#### ČERTOVO JEZERO

